

Verformungsverhalten einer kombinierten Bogen-Gewichtsstaumauer unter Betriebsbedingungen

Dissertation
zur Erlangung des Grades
einer Doktor-Ingenieurin

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Sandra Fahland
aus Höxter

genehmigt von der
Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Maschinenwesen
der Technischen Universität Clausthal

Tag der mündlichen Prüfung:
10. Dezember 2004

Hauptberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Herbert Grill

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Manfred Wallner

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Laufe meiner wissenschaftlichen Tätigkeit am Institut für Geotechnik und Markscheidewesen der Technischen Universität Clausthal. Ihre Realisierung wäre ohne die tatkräftige Mithilfe einer Vielzahl von Beteiligten ungleich schwieriger gewesen.

An erster Stelle bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Herbert Grill. Er hat mir im Laufe meiner Tätigkeit am Institut stets die für meine wissenschaftliche Arbeit erforderlichen wie auch die für meine persönliche Entwicklung benötigten Freiräume gewährt, immer Interesse und Zeit für fachliche Diskussionen gefunden und mir jederzeit mit zahlreichen konstruktiven und stets freundschaftlichen Anregungen und Korrekturen zur Seite gestanden.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Manfred Wallner gilt mein Dank für sein Interesse an meiner Arbeit, seine konstruktiven Anregungen und die freundliche Übernahme des Korreferats der Arbeit.

Weiterhin möchte ich folgenden Personen vielen Dank sagen:

Den Mitarbeitern des Instituts für Geotechnik und Markscheidewesen für die kollegiale Zusammenarbeit.

Den für mich tätigen wissenschaftlichen Hilfskräften für die wertvolle Hilfe bei der Beschaffung der Literatur, der Durchführung der Messungen und Auswertung der Daten, der Anfertigung von Zeichnungen und Diagrammen sowie bei vielen weiteren Arbeiten. Frei von jeder Wertigkeit möchte ich sie hier in alphabetischer Reihenfolge nennen: Beate Baumbach, Aneta Flejszar, Andreas Graupner, Oliver Hartge, Kristin Schuster und Martin Tazl.

Der Harzwasserwerke GmbH für die Möglichkeit, das Projekt und die Arbeit zu realisieren sowie für die Bereitstellung weiterer Messdaten, ergänzender Informationen und Unterlagen.

Den Kollegen des Geodätischen Instituts der Universität Hannover dafür, dass sie mir Messgeräte und ergänzenden Messdaten zur Verfügung gestellt und mich in vielfältiger Weise unterstützt haben.

Den Kollegen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig für zahlreiche konstruktive Diskussionen, Anregungen und vielfältige Unterstützung.

Dem Ingenieurbüro „Prof. Rodatz und Partner“ für die freundliche und unkomplizierte Leihgabe von Messgeräten.

Vielen weiteren, nicht einzeln aufgelisteten Personen und Institutionen, die mich während der Ausarbeitung meiner Dissertation begleitet und unterstützt haben.

Bedanken möchte ich mich ganz besonders herzlich bei Herrn Dr.-Ing. Enrico Markus, meiner Schwester Kerstin und meinem Freund Stephan, die viele Stunden mit Korrekturlesen und zahlreichen weiteren Hilfestellungen in diese Arbeit investiert haben.

Insbesondere möchte ich meinem Freund, meinen Eltern, meiner Schwester und meinen Freunden für ihre Geduld, ihre Unterstützung, ihren Ansporn und ihr Verständnis auf dem Weg zur Realisierung dieser Arbeit meinen Dank aussprechen. Meinen Eltern danke ich zudem, dass sie mir die Ausbildung ermöglicht haben und meine Entscheidung zur Promotion jederzeit nach Kräften unterstützt haben.

Clausthal-Zellerfeld, im September 2004

Sandra Fahland

Abstract

In der vorliegenden Arbeit wurde das Verformungsverhalten einer kombinierten Bogen-Gewichtsstaumauer im Betriebszustand analysiert. Mit umfangreichen Messungen wurden die realen Umwelteinwirkungen und die resultierenden Bauwerksreaktionen über etwa drei Jahre erfasst. Durch die Kombination von Messungen und FEM-Simulation konnten zahlreiche thermische und mechanische Parameter verifiziert werden. Damit lassen sich das Temperatur- und Verformungsverhalten für beliebige Einwirkungskombinationen untersuchen.

Primär verformungsrelevant sind die Änderungen der Stauhöhe und der Temperaturen. Erstere lösen direkt Staumauerverformungen aus, während die Umgebungstemperaturen erst zeitversetzt zu Bauwerksverformungen führen. Diese zeitabhängigen thermischen Prozesse wurden im Wärmeflussmodell erfasst.

Die aus den Änderungen der Stauhöhe und der resultierenden Mauertemperaturen Verformungsänderungen wurden mit dem Strukturmodell berechnet.

Die Analysemodelle wurden auf das beobachtete Staumauerverhalten eingestellt, indem in diversen Parameterstudien die Elementierung und Materialkennwerte optimiert wurden. Damit wurden die Verformungen in temperatur- und stauhöheninduzierten Anteile aufgeteilt, das Zusammenspiel der beiden Mauteile untersucht und der Einfluss der Fugenausbildung im Gewichtstmauerteil belegt. Der von der thermischen Belastungsgeschichte abhängige Temperaturverlauf im Bauwerk sowie das mechanische Verformungsverhalten wurden numerisch über den untersuchten Zeitraum simuliert. Das entwickelte Analysewerkzeug dient zum Verständnis der einzelnen Verformungseffekte und zur Interpretation der Überwachungsmessungen.

In the exposition the deformation behaviour of an arch dam with mounted gravity dam in working condition has been analysed. The environmental actions and the structural response have been captured with various measurements for about three years. Due to the combination of measurements and FEM-simulation numerous thermal and mechanical material properties could be verified. Thus the temperature and deformation behaviour of any combination of actions can be tested.

The pertinent effects of deformation behaviour are caused by the change in height of raised water and temperature. The water height causes immediate deformation of the concrete dam, while the ambient temperatures slowly change the temperature of the concrete dam and lead to a delayed deformation. This time-dependant thermal process is captured by using a transient heat flux model. The change of deformation caused by the change of concrete dam temperature and height of raised water were calculated by structural analysis.

The FEM-models were set to the observed deformation behaviour by optimising the element mesh and the material properties in various courses of design optimization. Because of that the deformation has been assigned to the parts of deformation caused by change of dam temperature and change of height of raised water. Also the interaction between the two structural forms of concrete dam has been analysed and the effect of joint construction on the gravity dam has been verified. For the considered time period the temperature distribution of the structure depending on thermal load history has been numerically simulated as well as the mechanical deformation behaviour. The developed simulation tool supports the comprehension of each deformation effect and the interpretation of measurement and monitoring.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Verformungsverhalten von Betonstaumauern	5
2.1	Staumauertypen und ihr Trag- bzw. Verformungsverhalten	5
2.2	Einwirkungen auf Betonstaumauern	8
2.2.1	Eigengewicht	10
2.2.2	Wasserdruck	10
2.2.2.1	Staudruck vom Stauraum	10
2.2.2.2	Sohlenwasserdruck	10
2.2.3	Formänderungen infolge Temperaturschwankungen	11
2.3	Materialeigenschaften	12
2.4	Überwachungsmessungen	12
2.5	Statistische und deterministische Modelle	13
2.5.1	Statistische Modelle	13
2.5.2	Deterministische Modelle	14
2.5.2.1	Verformungsmodelle	14
2.5.2.2	Wärmeflussmodelle	16
3	Untersuchte Staumauer	17
3.1	Die Okertalsperre	17
3.2	Konstruktion und Besonderheiten	19
3.2.1	Geologie am Staubecken und an der Sperrenstelle	19
3.2.2	Konstruktion der Hauptsperre	21
3.2.3	Der Talsperrenbeton	23
4	Messkonzept und Messergebnisse der Okertalsperre	25
4.1	Messkonzept und Realisierung	25
4.1.1	Mess- und Kontrolleinrichtungen der Harzwasserwerke GmbH	25
4.1.1.1	Eingesetzte Maihak-Messgeber nach dem Schwingsaitenmessverfahren	27
4.1.2	Messeinrichtungen des Instituts für Geotechnik und Markscheidewesen	28
4.1.2.1	Eingesetzte Messgeräte	29
4.1.2.1.1	Nivel 20 der Firma Leica	29

4.1.2.1.2	Inklinometersonde NMGD der Firma Glötzl	31
4.1.2.1.3	Fissurometer 15/200/80M der Firma Glötzl	32
4.1.3	Messkonzept zur Erfassung des Verformungsverhaltens der Okertalsperre	33
4.1.4	Fernsteuerung der kontinuierlichen Messungen	38
4.2	Messergebnisse	41
4.2.1	Nivel 20	41
4.2.2	Inklinometer- und Lotmessungen	48
4.2.3	Fugennessgeräte	50
4.3	Abweichungen vom Idealmesskonzept	52
5	FE-Modell zur Verformungsanalyse	56
5.1	Grundlagen der FEM und Modellgenerierung	56
5.1.1	Das Grundprinzip der FEM und Anwendungsprogramme	56
5.1.1.1	Festigkeitsberechnungen	57
5.1.1.2	Temperaturfeldberechnungen	58
5.1.2	Ablauf einer FEM-Analyse für strukturmechanische und thermische Fragestellungen	59
5.1.3	Das Programmsystem ANSYS	62
5.1.3.1	ANSYS-Kommandosprache und Batch-Betrieb	62
5.1.3.2	ANSYS Parametric Design Language (APDL) und Macros	62
5.1.3.3	Verwendete Einheiten in ANSYS	62
5.2	FE-Modellierung der Staumauer für Verformungsuntersuchungen im Betriebszustand	63
5.2.1	Ziel der FEM-Analyse und Vorüberlegungen	63
5.2.2	Verwendetes Koordinatensystem	65
5.2.3	Idealisierung der Staumauergeometrie	66
5.2.4	Idealisierung des Materialverhaltens	70
5.2.4.1	Definition des Verformungsmoduls und verwendetes Materialgesetz	70
5.2.4.2	Die Materialparameter	73
5.2.5	Elementtyp und Diskretisierung	77
5.2.6	Idealisierung der Einwirkungen	80
5.2.6.1	Wasserdruck	80
5.2.6.2	Temperaturänderungen	81

5.2.6.3	Datenbank der gemessenen Einwirkungen	82
5.2.7	Transiente Temperaturfeldanalyse	84
5.2.7.1	Allgemeines	84
5.2.7.2	Initialzustand	85
5.2.7.3	Thermische Belastung	87
5.2.7.4	Ablauf der thermischen Berechnung	87
5.2.8	Strukturanalyse zur Verformungsberechnung	88
6	Validierung des Analysemodells mit Hilfe der Messwerte	90
6.1	Elementtyp und Netzgeometrie	90
6.2	Einfluss der Stauhöhe auf das Verformungsverhalten	91
6.3	Einfluss der Umgebungstemperaturen	92
6.4	Transiente Temperaturfeldanalyse	93
6.4.1	Parameterstudie der Wärmeleitfähigkeit unter Einbeziehung der gemessenen Betontemperaturen	93
6.4.2	Ergebnisse der transienten Temperaturfeldanalyse	97
6.5	Parameterstudien in der Strukturberechnung unter Einbeziehung der Messergebnisse	100
6.5.1	Allgemeines zu den Parameterstudien	100
6.5.2	Der Wärmeausdehnungskoeffizient der Okerstaumauer	101
6.5.3	Die Verformungsmoduln der Okerstaumauer	104
6.5.3.1	Allgemeines zur Parameterstudie der Verformungsmoduln	104
6.5.3.2	Parameterstudie für Einwirkungsdifferenzen aus der Stauhöhe	105
6.5.3.3	Parameterstudie für Einwirkungsdifferenzen aus der Temperatur	109
6.5.3.4	Parameterstudie für Einwirkungsdifferenzen aus Stauhöhe und Temperatur	110
6.5.4	Numerische Simulation der gemessenen Verformungen	111
6.5.5	Einfluss der Fugenmodellierung	116
6.6	Temperatur- und stauhöheninduzierte Verformungsanteile	120
7	Schlussbetrachtung	124
	Literaturverzeichnis	129
	Anhang	A1

Erklärung der verwendeten Formelzeichen

A	Fläche
α	Wärmeausdehnungskoeffizient
α_i	Winkel
b	Breite
b_L	Bogenlänge
BT_i	Betontemperatur an der Stelle i
c	Material-Wärmekapazität
$[c]$	Matrix der Wärmekapazität
C	Messkonstante des Maihak-Messgebers
c_p	spezifische Wärmekapazität des Materials
Δi und δi	Differenz des Parameters i , z.B.: $\Delta \sigma$ Spannungsdifferenz
$\Delta x_i, \Delta y_i$	gemessene Neigungsänderung
E	Elastizitätsmodul (E-Modul)
ε	Dehnung
G	Eigengewicht
f	Saitenfrequenz
f_i	Volumenkräfte
$f_{(x, y, z)}$	Funktion für innere Wärmequellen
γ_w	Wichte von Wassers
h	Höhe
I	Flächenträgheitsmoment
$[K]$	Steifigkeitsmatrix
$[k]$	Matrix der Wärmeleitfähigkeit
l	Länge
λ_i	Material-Wärmeleitfähigkeit in der jeweiligen Raumrichtung
λ_s	Abminderungsfaktor für den Sohlenwasserdruck
$p(x)$	Streckenlast
$\{Q\}$	Lastvektor
Q	Wärmestrom
$\{Q(t)\}$	zeitlich veränderlicher Vektor der von außen zu- oder abgeführten Wärmeströme
R	Resultierende Bogenschubkräfte
R_{fal}	Radius Abschluss Felsmodell luftseitig
R_{faw}	Radius Abschluss Felsmodell wasserseitig

R_{fli}	Radius Felseinbindung luftseitig
R_l	Radius zur Luftseite
R_{maxbi}	Radius größte Mauerbreite
R_{mf}	Radius Mauerfußpunkt
R_w	Radius zur Wasserseite
ρ	Dichte des Materials
S	Sohlenwasserdruck
σ	Spannung, Festigkeit
T	Temperatur
T_F	Temperatur im Fluid außerhalb der Grenzschicht
T_w	Oberflächentemperatur
$\{T\}$	Vektor der Temperaturen
$\{\dot{T}\}$	Vektor der Temperaturänderungen (1. zeitliche Ableitung)
T_s	Scherkraft
t	Zeit
$\text{teta } i$	Winkel zur Lagebestimmung des Querschnitts
$\tau_{ij,j}$	Spannungen in den drei Raumrichtungen
$\{u\}$	Knotenverschiebungsvektor
V	Verformungsmodul (V-Modul)
W	Resultierender Wasserdruck
WT_i	Wassertemperatur an der Stelle i
x, y, z	Koordinaten bzw. Länge
Z_{bm}	Oberkante Bogenstaumauer
Z_{fa}	Höhe Abschluss Felsmodell
Z_{fli}	Höhe Felseinbindung luftseitig
Z_{fwi}	Höhe Felseinbindung wasserseitig
Z_{maxbi}	Höhe größte Mauerbreite
Z_{mfi}	Höhe Mauerfußpunkt
Z_{ok}	Höhe Oberer Kontrollgang
Z_{qa1}	Höhe Beginn Verbreiterung Querschnitt
Z_{sgm}	Oberkante Schwergewichtsmauer
Z_w	Höhe Wasserstand

1 Einleitung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde das Verformungsverhalten der Okerstaumauer im Betriebszustand ausführlich untersucht. Durch die Verknüpfung von Messungen am Bauwerk und dreidimensionalen FEM-Berechnungen konnten einsatzfähige Analysemodelle zur Simulation des Temperatur- und Verformungsverhaltens erstellt werden. Diese Analysemodelle wurden entwickelt, indem in verschiedenen Parameterstudien die Elementierung, der Ansatz der Lastaufbringung sowie nur näherungsweise bekannte Materialparameter optimiert wurden. Mit dem so erarbeiteten Analysewerkzeug konnten das Verhalten der komplexen und außergewöhnlichen Konstruktionsform der Okerstaumauer unter verschiedenen Gesichtspunkten detailliert erforscht sowie die besondere Bedeutung der Temperaturen für das Bauwerk aufgezeigt werden.

Die Interpretation von Messungen durch numerische Simulation ist für die Überwachung von Talsperren in der Betriebsphase grundsätzlich zu empfehlen, da deterministische Modelle im Gegensatz zu den üblicherweise verwendeten statistischen Auswerteverfahren physikalisch fundierte Analysen des komplexen Verformungsverhaltens von Staumauern erlauben. Bei Talsperren werden hohe Anforderungen an die Überwachung gestellt, da im Versagensfall gewaltige Schäden zu erwarten sind. Grundsätzlich lässt sich die Sicherheit eines Absperrbauwerks in einen konstruktiven und einen betrieblichen Bereich unterteilen. Den konstruktiven Bereich bildet die korrekte statische Bemessung zur Sicherstellung der Trag- und Standsicherheit des Absperrbauwerks. Um die konstruktive Sicherheit von Talsperren dauerhaft zu gewährleisten, müssen sie hinsichtlich ihres Zustands sowie ihres Verhaltens regelmäßig messtechnisch und visuell überwacht werden, damit jede Anomalie im Verhalten des Absperrbauwerks, ihrer Gründung oder ihrer Umgebung frühzeitig erkannt wird. Diese zielgerichtete Überwachung in der Betriebsphase, zu welcher der Talsperrenbetreiber verpflichtet ist, wird als betriebliche Sicherheit bezeichnet. Vorgaben und Richtlinien für die Überwachung von Talsperren enthalten u. a. die DIN 19700 Teil 10 und 11 oder das DVWK Merkblatt 231/1995.

Die gewonnenen Messwerte müssen in geeigneter Art und Weise zeitnah zu den durchgeführten Messungen ausgewertet, analysiert und interpretiert werden. Grundbedingung für die aussagekräftige Beurteilung der Messungen ist das gleichzeitige Erfassen von Umwelteinwirkungen und Bauwerksreaktionen. Für die Interpretation der beobachteten Messungen werden die Messwerte der Bauwerksreaktionen „definierten“ Sollwerten gegenübergestellt, um den Zustand und das Verhalten des Absperrbauwerks beurteilen zu können.

Diese „definierten“ Sollwerte können entweder aus statistischen oder deterministischen Modellen resultieren. Den Regelfall stellen bei Staumauern die statistischen Auswerteverfahren dar, bei denen das aktuelle Staumauerverhalten mit den Messwerten vergangener Jahre oder denen ähnlicher Bauwerke verglichen wird. Aus den zuvor genannten Gründen sollte auch für bestehende Staumauern nachträglich ein Berechnungsmodell, beispielsweise ein **Finite-Elemente-Modell** (FE-Modell), erstellt werden. Mit diesem Analysemodell können die tatsächlichen Betriebsbeanspruchungen und damit das Verformungsverhalten des Absperrbauwerks simuliert werden, um im Vergleich mit den Messergebnissen das reale Verformungsverhalten beurteilen zu können. Daraus ergibt sich zudem eine Optimierung der Bauwerksüberwachung und des Messkonzepts. Die Erstellung eines Berechnungsmodells erfordert viele Annahmen bei der Geometrie und den Materialkennwerten. Das Berechnungsmodell kann demzufolge nur plausib-

le Ergebnisse liefern, wenn eine Kalibrierung an erhobenen Messwerten erfolgt und die Berechnungsannahmen somit validiert werden. Die Messungen und das Berechnungsmodell stehen also in einer gegenseitigen Abhängigkeit zueinander. Damit kann das tatsächliche Verhalten einer Staumauer durch sorgfältiges Messen und Analysieren der Messergebnisse am ausgeführten Bauwerk in Kombination mit einem Berechnungsmodell praxisnah untersucht werden.

Die Kombination von Messungen und Berechnungen stellt in der Überwachung von Staumauern im Betriebszustand derzeit noch die Ausnahme dar, da der Aufwand für die nachträgliche Erstellung eines Wärmefluss- oder Verformungsmodells relativ groß ist. Für Stand- und Tragsicherheitsuntersuchungen von Staumauern, die geplant oder saniert werden, ist es inzwischen Stand der Technik, FE-Berechnungen einzusetzen. Dabei werden jedoch ausschließlich numerische Berechnungsmodelle auf Grundlage der Planungsunterlagen erstellt. Für einzelne Staumauern wurde bereits die Kombination von Messung und Berechnungsmodell zur Verformungsanalyse eingesetzt, vgl. [14], [106], [167] und [169]. Bei den untersuchten Staumauern handelte es sich jedoch ausschließlich um Gewichtsstaumauern, für die zweidimensionale FE-Modelle zur Temperaturfeld-, Strömungs- und Verformungsberechnung erstellt wurden. Aufgrund des Tragverhaltens von Gewichtsstaumauern ist die 2D-Betrachtung ausreichend, um Aussagen stellvertretend für das Verhalten des Gesamtbauwerks zu erhalten. Diese Vereinfachung, die Staumauer auf ein zweidimensionales Modell zu reduzieren, ist für Bogenstaumauern und kombinierte Bogen-Gewichtsstaumauern nicht möglich, da die räumliche Tragwirkung berücksichtigt werden muss.

Die in der vorliegenden Arbeit untersuchte Thematik entstand bei der Durchführung von Sensortests für ein Forschungsvorhaben. Dabei wurden die Praxistauglichkeit und das Langzeitverhalten der Testsensoren im Messalltag geprüft. Als Referenzobjekt für diese Untersuchungen diente das Hauptabsperrbauwerk der Okertalsperre. Im Rahmen der Sensortests entstand die Frage nach dem Verformungsverhalten des Absperrbauwerks unter Betriebsbedingungen. Kombinierte Bogen-Gewichtsstaumauern, wie die Okerstaumauer, stellen eine seltene Konstruktionsform dar, die aus einer Bogenstaumauer mit aufgesetzter Schwergewichtsmauer besteht. Sie werden ausgeführt, wenn die geologischen oder räumlichen Verhältnisse keine wirtschaftliche Konstruktion einer reinen Bogenstaumauer zulassen. Bei der Okerstaumauer ist der obere Hangbereich als Widerlager für eine Bogenstaumauer nicht geeignet, daher wurde für diesen oberen Mauerbereich eine Gewichtsmauer gewählt, die alle einwirkenden Lasten auf die darunter liegende Bogenmauer ableitet. Diese trägt die Belastung über Bogenwirkung in die flankierenden Hänge und in den Untergrund ab. Die beschriebene Tragwirkung der beiden zusammengesetzten Mauertypen soll durch eine entsprechende räumliche Anordnung und die unterschiedliche konstruktive Ausbildung der vertikalen Mauerfugen erzielt werden. Ob das tatsächliche Verformungsverhalten der Staumauer der vorgegebenen Konstruktion folgt, kann nur eine genaue Untersuchung des tatsächlichen Verformungsverhaltens zeigen.

Diese Verformungsanalyse kann grundsätzlich mit Messungen an bestehenden Staumauern oder durch numerische Simulation erfolgen. Einzeln angewendet liefern beide Verfahren jedoch keine eindeutigen Ergebnisse, daher wurde das Verformungsverhalten der Hauptstaumauer der Okertalsperre mit der Verknüpfung aus beiden Methoden untersucht.

Dazu wurden mit einem umfassenden Messsystem über mehr als drei Jahre die Umwelteinwirkungen sowie die daraus resultierenden Verformungsgrößen der Mauer erfasst. Einen Schwerpunkt des Messkonzepts bildeten kontinuierliche Verformungsmessungen mit neun Neigungs-

sensoren „Nivel 20“ der Firma Leica, die an diskreten Stellen innerhalb des Mauerkörpers installiert wurden. Dadurch konnte ein detailliertes Bild der auftretenden Verformungen gewonnen werden, wie es durch die regulären Überwachungsmessungen in der Regel nicht gewonnen werden kann. Anhand der Messergebnisse konnte frühzeitig eine enge Korrelation zwischen den Verformungen einerseits und den Änderungen der Stauhöhe sowie der Temperatur im Mauerkörper andererseits festgestellt werden. Während die Stauhöhe relativ einfach und exakt zu messen ist und eine sofortige Mauerverformung verursacht, kann die Temperaturverteilung im Inneren der gesamten Mauer nicht gemessen werden. Änderungen der Umgebungstemperatur führen erst zeitversetzt zu Mauerverformungen, da die große Wärmespeicherkapazität von massiven Bauwerken den Temperatúrausgleich in der Staumauer verzögert. Auf Basis der Messungen kann daher keine Aufteilung der Verformungsanteile auf die beiden Einwirkungen erfolgen.

Um die aufgetretenen Fragen nach dem genauen Verformungsverhalten der komplexen Konstruktionsform, der Aufschlüsselung der Verformungsanteile auf die einzelnen Einwirkungen sowie dem Temperaturverhalten des massiven Bauwerks beantworten zu können und das Verständnis für das Staumauerverhalten zu erhöhen, wurde ein dreidimensionales FE-Modell der kombinierten Bogen-Gewichtsstaumauer und des umgebenden Untergrunds zur genauen Simulation des Staumauerverhaltens erarbeitet. Bei der mechanischen Simulation und der Wärmeflussmodellierung wurden aufgrund unbekannter Parameter, wie z. B. der Materialkennwerte, die einem weitgehend unbekannten Alterungsprozess unterliegen, mit Hilfe von Literaturangaben und Vergleichsberechnungen zahlreiche, möglichst realitätsnahe Annahmen der Werte getroffen sowie geeignete Berechnungsansätze verwendet. Für die wesentlichen Parameter wurden durch Sensitivitätsstudien im Vergleich mit den Messergebnissen Arbeitswerte festgelegt. Der Einfluss der Parameter auf die Berechnungsergebnisse wurde minimiert, indem bei der strukturmechanischen Analyse nur die Zustandsänderungen zwischen zwei Zeitpunkten berücksichtigt wurden.

Mit Hilfe dieses Analysewerkzeugs konnten nach Abschätzung der unbekannten Parameter sowohl das mechanische Verhalten des kompletten Bauwerks als auch der Temperaturverlauf im Mauerkörper in Abhängigkeit von der thermischen Belastungsgeschichte über den gesamten Zeitraum simuliert werden. Als Eingangswerte für diese transiente Temperaturanalyse wurden die in dem Messzeitraum erfassten Luft- und Wassertemperaturen verwendet. Für das strukturmechanische Verformungsmodell konnte die lineare Elastizitätstheorie zugrunde gelegt werden, weil nachgewiesen werden konnte, dass im Betriebszustand der Okerstaumauer nur Spannungen und Dehnungen auftreten, die sich in einem schmalen Bereich des Spannungs-Dehnungs-Diagramms bewegen.

In die Arbeit einführend wird im zweiten Kapitel zunächst ein Überblick über die unterschiedlichen Konstruktionsformen von Staumauern und das zugehörige charakterisierende Trag- und Verformungsverhalten gegeben. Dazu gehört eine Übersicht über die verschiedenen Einwirkungen auf Staumauern sowie über ihren Einfluss auf die Bauwerksverformungen. In direktem Zusammenhang mit der Konstruktionsform stehen die notwendigen Überwachungsmessungen sowie die entsprechenden statistischen und deterministischen Auswerteverfahren. Den dritten Teil der Arbeit bildet die Beschreibung der Okerstaumauer, die als Anwendungsobjekt für die durchgeführten Verformungsuntersuchungen unter Betriebsbedingungen diente. Dabei werden

im Hinblick auf die Bedeutung für die Verformungsanalyse ein kurzer Überblick über die Planung und den Bau der Okertalsperre gegeben, die Konstruktion und ihre Besonderheiten erläutert sowie die Geologie und der Talsperrenbeton materialtechnisch beschrieben. Aufbauend auf die damit bekannte Staumauergeometrie, ihre Konstruktion und das dadurch zu erwartende Verformungsverhalten, beschreibt der vierte Abschnitt das umgesetzte Messkonzept sowie die eingesetzten Messgeräte mit ihrem Messprinzip und ihren Messgenauigkeiten. Weiterhin sind die Installation und der laufende Messbetrieb einschließlich der betriebenen Fernwartung dokumentiert. Daran anschließend sind die statistisch aufbereiteten Messergebnisse, der Vergleich zwischen den gemessenen Einwirkungsgrößen und den daraus resultierenden Verformungen sowie eine Gegenüberstellung der verschiedenen Verformungsmessungen dargestellt. Die Interpretation und Bewertung der Messungen sowie der Zusammenhänge zwischen Einwirkungen und Bauwerksreaktionen bilden den Abschluss des Kapitels.

Im darauf folgenden, fünften Abschnitt werden einleitend die Grundlagen der FEM, der prinzipielle Berechnungsablauf und das Programmsystem ANSYS beschrieben. Nachdem das Ziel der FE-Modellierung für die Okerstaumauer und die damit einhergehenden Vereinfachungen bei der Idealisierung dargelegt sind, werden der Aufbau des dreidimensionalen geometrischen Modells, das Materialverhalten sowie die verwendeten Elementtypen erläutert. Detailliert wird auf den eingeführten Berechnungsansatz für die strukturmechanische Analyse eingegangen, bei dem nur mit den Differenzen der Einwirkungen gerechnet wird. Dieser Ansatz wurde gewählt, um bei der Sensitivitätsstudie die Einflüsse der einzelnen Parameter, die im Vorfeld der Berechnung nur näherungsweise bekannt waren und durch die Parameterstudie bestimmt wurden, zu minimieren. Abschließend werden in diesem Kapitel die aus dem Geometriemodell entwickelten FE-Modelle für die transiente Temperaturfeldanalyse, mit der die Temperaturverteilung im Bauwerk zu jedem beliebigen Zeitpunkt berechnet werden kann, und die daran anschließende strukturmechanische Verformungsanalyse umfassend erklärt.

Im sechsten Kapitel werden die verschiedenen Parameterstudien einschließlich ihrer Ergebnisse vorgestellt. Die Erkenntnisse aus der transienten Temperaturfeldanalyse werden ausführlich dargelegt. Des Weiteren werden die Verformungsverläufe vorgestellt, die über einen etwa zweieinhalbjährigen Zeitraum der gemessenen Verformungen numerisch mit dem Strukturmodell simuliert wurden. Die Ergebnisse aus Messungen und Berechnungen werden umfassend verglichen, analysiert, diskutiert und bewertet. Zusätzlich wird der Einfluss der Fugenausbildung im Schwergewichtsmauerteil numerisch untersucht und dokumentiert. Des Weiteren erfolgt die Zuordnung der Verformungsanteile, die mit Hilfe des FE-Modells in temperatur- und stauhöhen-induzierte Anteile aufgeschlüsselt werden konnten, sowie eine Beurteilung der daraus gewonnen Erkenntnisse. Den Abschluss der Arbeit bildet die Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse aus den durchgeführten Untersuchungen.

2 Verformungsverhalten von Betonstaumauern

2.1 Staumauertypen und ihr Trag- bzw. Verformungsverhalten

Bei Absperrbauwerken von Talsperren wird grundsätzlich zwischen Staudämmen und Staumauern unterschieden. Die Mauern bestehen bei alten Bauwerken aus Bruchsteinmauerwerk oder bei neueren Mauern aus Beton, während die Dämme aus Erd- oder Felsschüttungen konstruiert werden. Weltweit beträgt der Anteil der Staumauern unter den Absperrbauwerken nur etwa 17%. Dieses Verhältnis spiegelt sich auch in Deutschland wider.

Im Hinblick auf die untersuchte Fragestellung, die sich auf Staumauern bezieht, werden nachfolgend ausschließlich die Staumauern näher betrachtet. Eine Übersicht über mögliche Staumauertypen und das verwendete Material enthält Abb. 2.1.

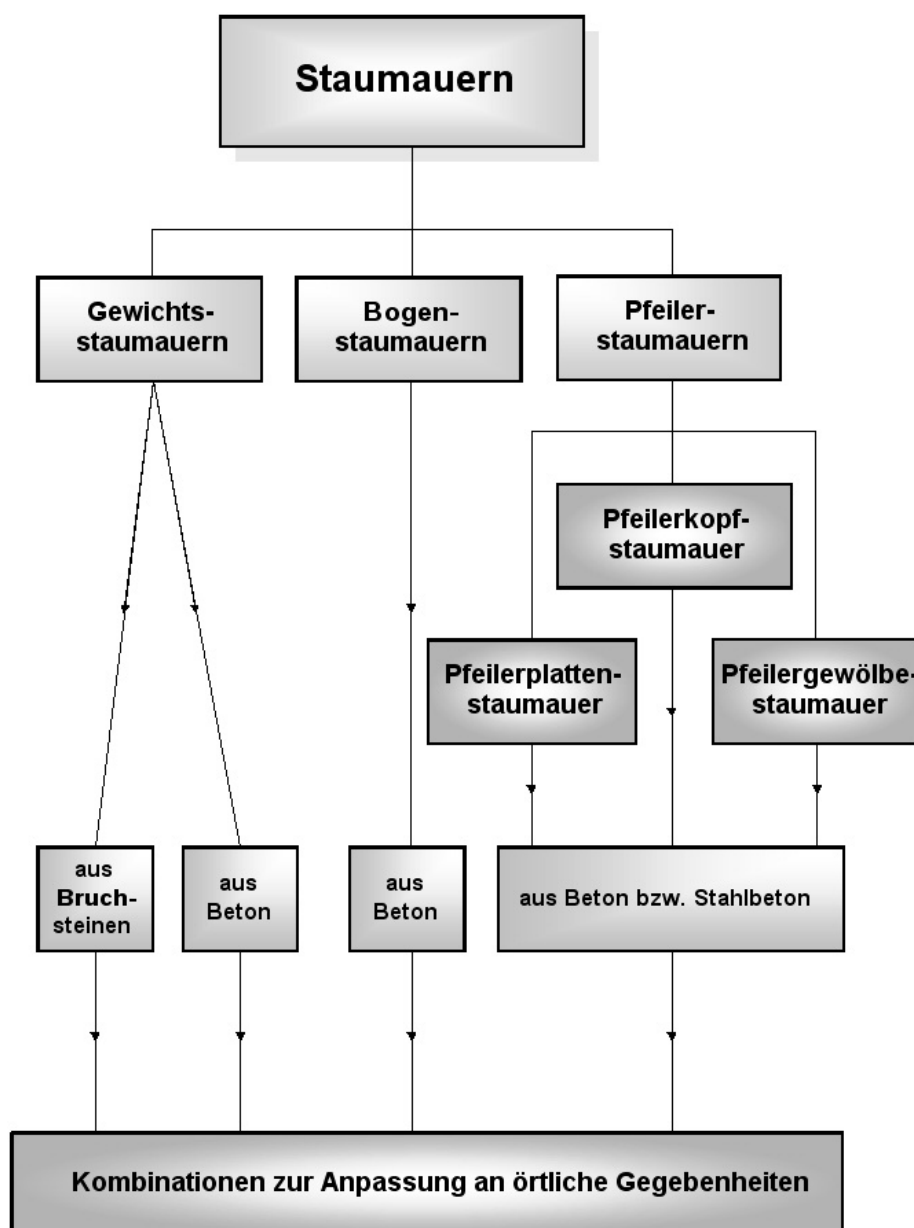


Abb. 2.1: Übersicht der verschiedenen Staumauerkonstruktionsformen [nach 141]

Die Wahl der Bauart der Staumauer wird im Wesentlichen durch die nachfolgenden Kriterien bestimmt:

- Geologische Verhältnisse
- Talform
- Stauhöhe
- Erdbebengefahr
- Ausbildung der Hochwasserentlastung
- Frage, ob das Flusswasser während der Bauarbeiten im Tal zu belassen ist
- Frage, ob eine Straße über die Staumauer zu führen ist
- Möglichkeiten der Bauverfahrenstechnik
- Möglichkeiten des Geräteeinsatzes
- Möglichkeiten der Materialbeschaffung
- Möglichkeiten der Fachkräfte
- Baukosten
- Unterhaltungskosten
- Sicherung gegen äußere Angriffe
- Gestaltung und Landschaftsbild
- Klima

Vorrangige Entscheidungsmerkmale sind dabei die geomechanischen und strukturgeologischen Felseigenschaften sowie die Talform.

Die verschiedenen Staumauertypen weisen in Abhängigkeit von ihrer Konstruktionsform auch ein unterschiedliches Trag- und Verformungsverhalten auf. Da die Pfeilerstaumauern für die weiteren Ausführungen keine Bedeutung haben, wird nachfolgend nur das Trag- und Verformungsverhalten von Gewichts- und Bogenstaumauern erläutert. Bei der Kombination von verschiedenen Staumauerbauarten in einem Bauwerk wirken alle Bauteile als Ganzes zusammen.

Gewichtsstaumauern sind massive Absperrbauwerke, die den horizontalen hydrostatischen Wasserdruck ausschließlich durch ihr Eigengewicht in den darunter liegenden Felsuntergrund übertragen, vgl. Abb. 2.2. Das statische Prinzip von Gewichtsstaumauern entspricht dem eines Kragträgers. Für Verformungs- oder Tragfähigkeitsuntersuchungen können sie in den meisten Fällen vereinfacht zweidimensional betrachtet werden.

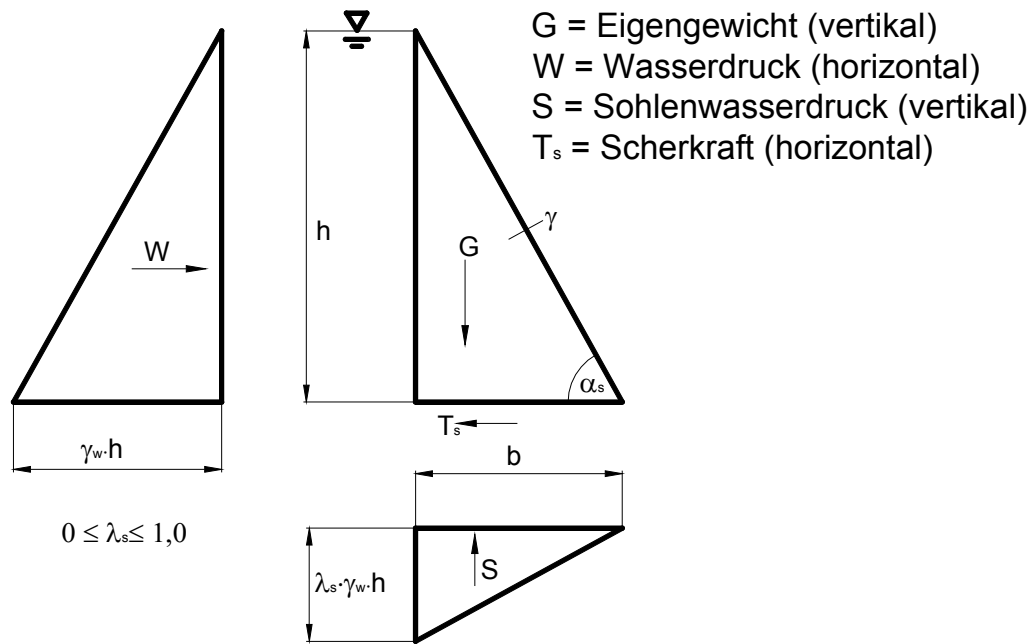


Abb. 2.2: Tragwirkung von Gewichtsstau Mauern [nach 141]

Als Bogenstaumauern werden Staumauern mit einfacher oder doppelter Krümmung bezeichnet, die sich als Schalentragwerk mit teilweise erheblicher Dicke von einer Talflanke zur anderen spannen oder auf künstlichen Widerlagern ruhen. Sie werden nach ihrer Bauart in Zylinder-, Gleichwinkel-, Kuppel- und Schalenstaumauern unterschieden. Bogenstaumauern leiten die angreifenden Kräfte in der gesamten Aufstandfläche über Schalentragwirkung in den Felsuntergrund. Dementsprechend tragen sie den hydrostatischen Wasserdruck aus der Stauhöhe entweder horizontal bei einfacher oder aber horizontal und vertikal bei doppelter Krümmung über Gewölbewirkung ab, vgl. Abb. 2.3. Bogenstaumauern eignen sich daher besonders gut für tiefe, enge Täler. Bei Verformungs- oder Tragfähigkeitsuntersuchungen sind prinzipiell dreidimensionale Betrachtungen erforderlich, um das Verhalten korrekt abzubilden.

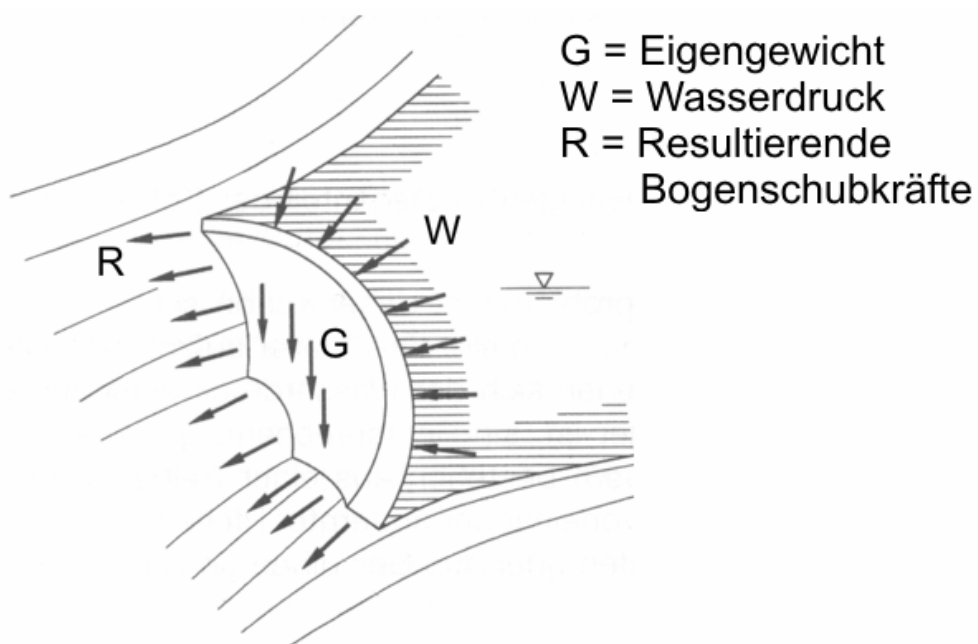


Abb. 2.3: Tragwirkung von Bogenstaumauern [141]

2.2 Einwirkungen auf Betonstaumauern

Sämtliche in Tab. 2.1 aufgeführten Einwirkungen können bei Talsperren, d.h. bei der Staumauer und dem anstehenden Felsuntergrund, als angreifende Kräfte gemäß DIN 19700 Teil 11 auftreten. Die Größen der auftretenden Einwirkungen sind den DIN-Normen DIN 19702 und DIN 1055 Teil 1 bis Teil 5 zu entnehmen.

Die Einwirkungen sind hinsichtlich ihrer Wirkung abgeschätzt worden. Entsprechend ihren Auswirkungen auf das Trag- und Verformungsverhalten des Gesamtbauwerks werden sie im Rahmen dieser Arbeit in zwei Gruppen unterteilt, vgl. Tab. 2.1. Eine Gruppe bilden die Einwirkungen, die für die Trag- und Standsicherheit von Betonstaumauern maßgebend sind, aber für die hier untersuchte Fragestellung des Verformungsverhaltens eine untergeordnete Bedeutung haben. Sie werden als Überblick in Tab. 2.1 aufgeführt, sollen jedoch nicht näher erläutert werden. Die zweite in Tab. 2.1 aufgeführte Gruppe umfasst die Einwirkungen, die bei der Untersuchung des Staumauerverformungsverhaltens im Betriebszustand berücksichtigt werden müssen, vgl. Abb. 2.4. Die für die untersuchte Fragestellung maßgebenden Einwirkungen dieser Gruppe werden nachfolgend kurz erläutert, weiterführende Angaben für alle Einwirkungen sind den o. g. Normen zu entnehmen.

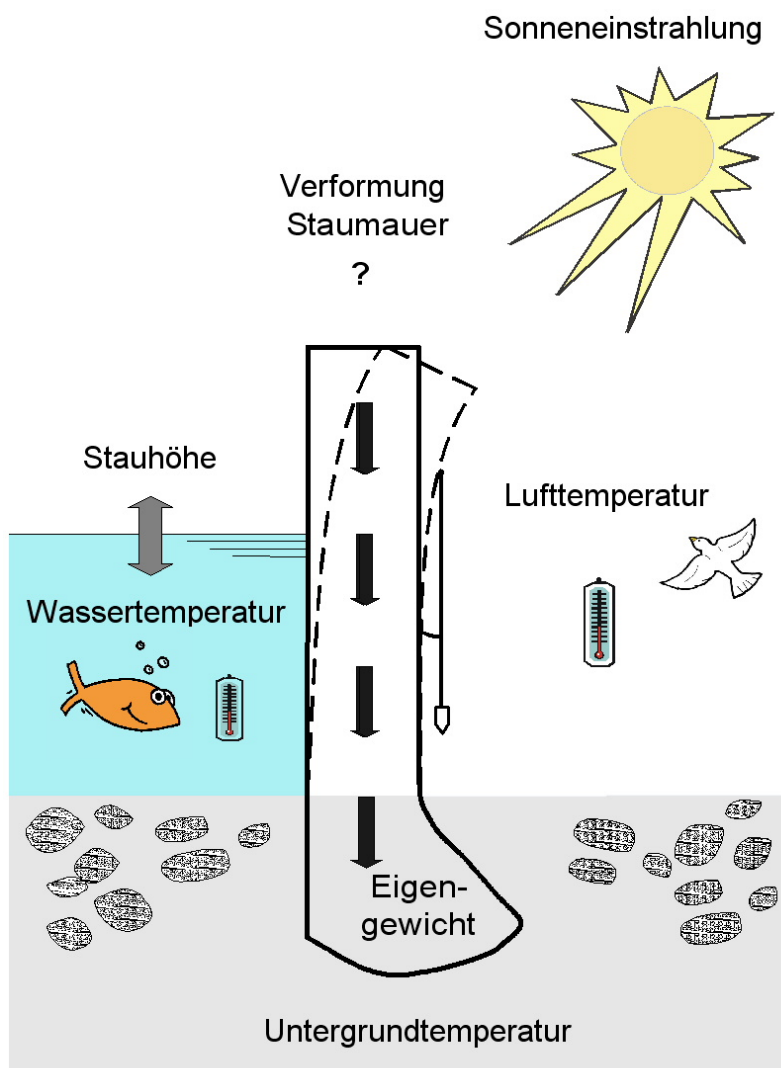


Abb. 2.4: Einwirkungen und Verformungen an Staumauern

Einwirkungen	Einfluss auf das Verformungsverhalten im Betriebszustand		Einfluss auf die Trag- und Standsicherheit
		abhängig von	
Eigengewicht	nicht vorhanden		hoch
Verkehrs- und Auflasten	gering bis hoch	Größe der Belastung	gering bis hoch
Temperaturschwankungen	hoch	Klimazone	gering
Staudruck vom Stauraum	hoch	Stauhöhe	hoch
Staudruck vom Unterwasser	nicht vorhanden bis gering	Stauhöhe Unterwasser	nicht vorhanden bis gering
Sohlenwasserdruck	gering bis hoch	Konstruktionstyp	gering bis hoch
Fugenwasserdruck	gering	Mauer- und Fugenzustand	gering
Porenwasserdruck	gering		gering
Kluftwasserdruck	gering		gering
Verlandungsdruck	gering	Ablagerungen	gering
Erddruck	nicht vorhanden bis gering		nicht vorhanden bis gering
Winddruck	gering	Klimazone	gering
Kriechen	gering		gering
Schwinden	gering		gering
Bau- und Reparaturlasten	nicht im normalen Betriebszustand	nicht vorhanden bis hoch	
Seltenes Temperaturereignis	nicht im normalen Betriebszustand	gering	
Wasserdruck bei Stauspiegel bis Mauerkrone	nicht im normalen Betriebszustand	hoch	
Wellenanprall	nicht im normalen Betriebszustand	nicht vorhanden bis hoch	
Bergbauliche Einwirkungen	nicht im normalen Betriebszustand	nicht vorhanden bis mittel	
Eis	nicht im normalen Betriebszustand	nicht vorhanden bis mittel	
Formänderung infolge Abbinden	nicht im normalen Betriebszustand	gering	
Plastische Formänderungen des Untergrundes	nicht im normalen Betriebszustand	nicht vorhanden bis hoch	
Erosionsprozesse im Fels	nicht im normalen Betriebszustand	nicht vorhanden bis hoch	
Versagen der Dränung	nicht im normalen Betriebszustand	nicht vorhanden bis hoch	
Anpralllasten	nicht im normalen Betriebszustand	nicht vorhanden bis hoch	
Überströmung des Mauerkörpers	nicht im normalen Betriebszustand	nicht vorhanden bis hoch	
Kräfte durch Sprengwirkung o.ä.	nicht im normalen Betriebszustand	nicht vorhanden bis hoch	
Erdbeben	nicht im normalen Betriebszustand	nicht vorhanden bis hoch	
Formänderungen durch nachträgliche Baugrundverbesserungen oder -dichtungen	nicht im normalen Betriebszustand	nicht vorhanden bis hoch	

Tab. 2.1: Übersicht über die Einwirkungen auf Betonstaumauern und deren Bedeutung für das Verformungsverhalten im Betriebszustand bzw. für die Trag- und Standsicherheit

2.2.1 Eigengewicht

Der Ansatz des Eigengewichts für Staumauern ist entsprechend den Vorgaben der DIN 1055 zu treffen. Die Wichte von Staumauerbeton liegt zwischen 24 und 26 kN/m³. Der Einfluss des Eigengewichts auf das Verformungsverhalten einer Staumauer und den Untergrund ist im Bauzustand und während der ersten Jahre nach dem Bau maßgeblich. In diesem Zeitraum treten im Untergrund große Verformungen aus dem aufgetragenen Eigengewicht der Staumauer auf. Diese Einflüsse des Eigengewichts sind nach einigen Betriebsjahren weitestgehend abgeklungen. Im weiteren Betriebszustand verändert sich das Eigengewicht jedoch nicht. Daher werden im Betriebszustand Verformungsänderungen primär durch Änderungen des Wasserdrucks und der Temperatur hervorgerufen.

2.2.2 Wasserdruck

Wasserdruck tritt bei Staumauern in verschiedenen Erscheinungsformen auf, dazu gehören der Staudruck vom Stauraum und vom Unterwasser sowie infolge der Sickerströmungen der Sohlen-, Fugen-, Kluft- und Porenwasserdruck. Grundsätzlich wirken Wasserdrücke senkrecht auf die äußeren Begrenzungsflächen des in das Wasser eintauchenden oder vom Wasser umströmten Bauwerkes. Abweichungen von diesem Ansatz sind in den entsprechenden DIN-Normen geregelt. Für die nachfolgenden Betrachtungen sind ausschließlich der Staudruck vom Stauraum sowie der Sohlenwasserdruck infolge der Sickerströmungen von Bedeutung.

2.2.2.1 Staudruck vom Stauraum

Mit einer Wichte von 10 kN/m³ ist der hydrostatische Staudruck des Wassers die am eindeutigsten definierte Einwirkung ohne nennenswerte Schwankungen, wie sie beispielsweise durch Unterschiede in der Zusammensetzung des Staumauerbetons auftreten können. Nur in Ausnahmefällen, nämlich bei schweb- und sinkstoffführenden Gewässern, wird im unteren Teil der Staumauer mit einem etwas größeren Wert für die Wichte gerechnet. Der Wasserdruck aus dem Stauraum zählt zu den entscheidenden Einflussgrößen auf das Verformungsverhalten einer Staumauer.

2.2.2.2 Sohlenwasserdruck

Jeder Staukörper erfährt nicht nur die Beanspruchung durch den Wasserdruck aus dem Stauraum und dem Unterwasser, sondern er unterliegt auch einem Wasserdruck auf die Mauerauflastfläche infolge der Durchströmung des Felsuntergrundes. Der Sohlenwasserdruck entsteht durch die Durchlässigkeit und Klüftigkeit des anstehenden Gesteins.

In der Gründungsfuge und in den übrigen nach unten gerichteten Begrenzungsflächen ist daher mit dem Auftreten von Sohlenwasserdruck zu rechnen. Der Wasserdruck wirkt von unten auf die Staumauer als Auftriebskraft und bewirkt eine Erhöhung des Kippmomentes sowie eine Verminderung der Sohlenpressungen. Die Bedeutung des Sohlenwasserdrucks hängt neben der Höhe des Drucks entscheidend von dem Konstruktionstyp der Staumauer ab. Bei Gewichts-

und Bogengewichtsstaumauern beeinflusst er den Nachweis der Kipp- und Gleitsicherheit und damit direkt die Stabilität, Standsicherheit sowie das Verformungsverhalten des Bauwerks. Bei Bogenstaumauern oder aufgelösten Staumauerkonstruktionen führt der Sohlenwasserdruck dagegen nur zu einer Spannungserhöhung im Beton infolge einer Kraftumlagerung, vgl. [156].

Erfahrungswerte zum Einfluss des Sohlenwasserdrucks auf das Verhalten von Staumauern liefert eine Studie über den „Auftrieb von Betonsperren“ [156], die die Arbeitsgruppe „Auftrieb“ des „Schweizerischen Nationalkomitees für Große Talsperren“ nach intensiven Untersuchungen veröffentlicht hat. Die Ergebnisse der Studie belegen, dass der Einfluss des Sohlenwasserdrucks bei Bogenstaumauern von untergeordneter Bedeutung ist, wenn man die Auswirkungen des Sohlenwasserdrucks auf das Verformungsverhalten im Vergleich zu den Auswirkungen von Temperaturschwankungen und Stauhöhenänderungen betrachtet. Im Gegensatz dazu ist der Sohlenwasserdruck bei Gewichtsmauern maßgebend für die Standsicherheit des Bauwerks, da diese dem Wasserdruck durch ihr Eigengewicht entgegenwirken.

2.2.3 Formänderungen infolge Temperaturschwankungen

Die Verformungen und Bewegungen von Staumauern infolge der Temperatureinwirkungen liegen gemäß den langjährigen Beobachtungen der Talsperrenbetreiber ungefähr in der gleichen Größenordnung wie Verformungen infolge Wasserspiegelschwankungen, vgl. auch [91]. Es handelt sich um Bewegungen im Millimeterbereich, maximal im Zentimeterbereich. Die temperaturinduzierten Bauwerksverformungen werden durch die Temperaturschwankungen in der Staumauer verursacht, die wiederum durch Änderungen der Lufttemperatur, der Wassertemperatur, der Untergrundtemperatur, der Feuchtigkeit und der Sonneneinstrahlung hervorgerufen werden. Um den Anteil der temperaturinduzierten Verformungen rechnerisch zu prognostizieren, ist die Kenntnis der Temperaturverteilung im Mauerinneren erforderlich, da diese für die Temperaturverformungen der Staumauer maßgebend ist. Die Ermittlung der exakten Temperaturverteilung in der Staumauer ist mit Schwierigkeiten behaftet, die wie folgt begründet sind: Unter der Annahme eines linear-elastischen Materialverhaltens gilt für die Temperaturverformungsbeziehung das Gleiche wie beispielsweise für die Wasserstandsverformungsbeziehung. Die gleiche Temperaturverteilung bzw. die gleiche Wasserbelastung führt jederzeit zu gleichen Verformungen. Dagegen zeigt die Ausbildung der Temperaturverteilung ein grundsätzlich anderes Verhalten. Für die Verteilung der Mauertemperatur kann nicht von der Belastung durch die Umgebungstemperatur direkt auf die Reaktion des Bauwerks geschlossen werden. Die Ursache dafür liegt in der Wärmekapazität des Untergrunds, dem großen Wärmespeichervermögen von dem umgebenden Wasser und von dem massiven Betonbauwerk selbst. Die Temperaturverteilung zum Zeitpunkt T im Mauerinneren ist nicht nur von der Umgebungstemperatur, sondern auch maßgeblich von dem Temperaturfeld zum vorhergehenden Zeitpunkt T-1 abhängig. Eine identische Umgebungstemperatur erzeugt dementsprechend nicht das gleiche Temperaturfeld, wenn die Vorbelastung unterschiedlich ist, vgl. [167].

Für die Ermittlung der Temperaturverteilung im Mauerinneren gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten. Die Temperaturverteilung kann durch Temperatursensoren, die im Staumauerbeton implementiert sind, an diskreten Punkten gemessen werden. Auf der Grundlage der gemessenen Werte kann dann ein realistisches Temperaturfeld bestimmt werden. Sind die Mauerquer-

schnitte nicht mit einer entsprechenden Messtechnik ausgestattet, kann das Temperaturfeld im Mauerinneren alternativ durch Berechnungen aus den Umgebungstemperaturen, d.h. den Wasser-, Luft- und Untergrundtemperaturen, plausibel abgeleitet werden. Da das Temperaturfeld zum Zeitpunkt T neben den Umgebungstemperaturen maßgeblich von dem Temperaturfeld zum Zeitpunkt T-1 abhängt, ist eine instationäre, transiente Temperaturfeldberechnung erforderlich, um die Temperaturverteilung zu jedem beliebigen Zeitpunkt zu kennen. Die rechnerische Ermittlung der Temperaturverteilung basiert auf verschiedenen Annahmen und kann demnach, genauso wie die Temperaturfeldbestimmung auf Basis gemessener Temperaturwerte an diskreten Stellen, nur eine Annäherung an den realen Zustand widerspiegeln.

2.3 Materialeigenschaften

Außer der Konstruktionsform der Staumauer und den maßgeblichen Einwirkungen haben die Materialeigenschaften maßgeblichen Einfluss auf das Verformungsverhalten des Bauwerks. Mit dem Begriff Materialeigenschaften sind sowohl das Materialgesetz, vgl. Kap. 2.5.2.1, als auch die Materialparameter gemeint. Materialparameter, die auf das Verformungsverhalten von massiven Staumauern Einfluss haben, sind die Dichte, der Elastizitätsmodul, die Querdehnzahl, der Wärmeausdehnungskoeffizient und der Wärmeübergangskoeffizient. Entsprechend sind für die Berechnung der Temperaturverteilung im Bauwerk die Wärmeleitfähigkeit sowie die Wärmekapazität des Materials entscheidende Materialparameter. Die Materialparameter können sich infolge des Abbindeprozesses und damit in Abhängigkeit vom Betonalter oder auch aufgrund der Durchfeuchtung des Bauwerks verändern.

2.4 Überwachungsmessungen

Gemäß DIN 19700 Teil 10 und 11 sowie dem DVWK (**D**eutscher **V**erband für **W**asserwirtschaft und **K**ulturbau e.V.) Merkblatt 231/1995 gehört die zielgerichtete messtechnische Überwachung einer Talsperre zu den Aufgaben eines Talsperrenbetreibers, da Talsperren zu den technischen Großbauwerken mit sehr hohen Anforderungen an die konstruktive und betriebliche Sicherheit zählen. Das Mess- und Kontrollprogramm ist auf Konstruktion und Lage des Einzelbauwerks abzustimmen. Es kann daher von Talsperre zu Talsperre sehr unterschiedlich sein. Neben der visuellen Kontrolle ist im Allgemeinen die Erfassung der Verhaltensgrößen Sickerwasser, Verschiebungen und Verformungen, Sohlenwasserdrücke sowie der Einflussgrößen Temperatur, Stauhöhe und Niederschlag Bestandteil des Überwachungskonzepts. Die Messeinrichtungen müssen zudem geeignet sein, sowohl das Kurz- als auch das Langzeitverhalten der Stauanlagenteile einschließlich der Stauanlage und des Unterwasserbereichs zu erfassen. Eine Übersicht über die Aufgaben in der Talsperrenüberwachung gibt Abb. 2.5.

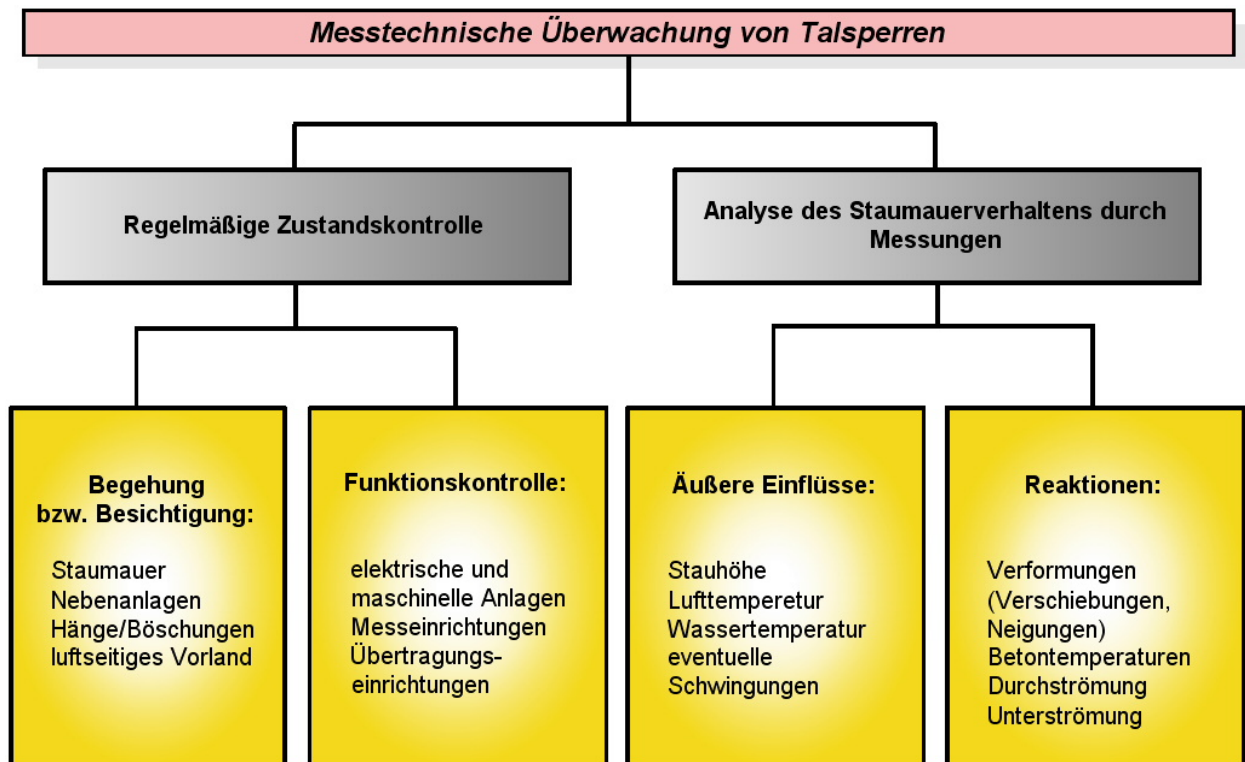


Abb. 2.5: Messtechnische Überwachung von Talsperren

2.5 Statistische und deterministische Modelle

2.5.1 Statistische Modelle

Zur Unterstützung der laufenden Überwachung und Bewertung des Staumauerverhaltens werden in der Regel statistische Analyseverfahren eingesetzt, um die Messergebnisse auszuwerten, zu analysieren und zu interpretieren. Ein statistisches Modell basiert auf dem Vergleich verschiedener Messwerte untereinander. Dabei wird das aktuelle Verhalten der Staumauer mit den Messwerten vergangener Jahre oder denen ähnlicher Bauwerke verglichen. Dabei können ganz einfache bis hin zu komplexen statistischen Gesetzen angewendet werden. Im Ergebnis kommt es zu einer Aussage über Änderungen im Verformungsverhalten des Bauwerks. Dieses Verfahren lässt aber keine Aussage darüber zu, wie sich das Bauwerk bei noch nicht aufgetretenen Lastfällen verhält. Somit liefert es für noch nicht aufgetretene Lastfälle auch keine Vergleichswerte. Zudem erlauben die Messungen bzw. die statistischen Modelle keinen Rückschluss auf das Bauwerk bzw. keine Erklärung, warum die auftretenden Einwirkungen zu den gemessenen Verformungen führen. Durch die Messungen lässt sich nur die Gesamtheit aller Verformungen erfassen, nicht aber die auf verschiedenen Ursachen beruhenden Verformungsanteile.

2.5.2 Deterministische Modelle

Deterministische Modelle beruhen im Wesentlichen auf dem Vergleich der gemessenen Werte mit einem Soll-Wert, vgl. auch [21]. Dieser Soll-Wert ergibt sich aus der Anwendung eines zu erstellenden Rechenmodells, das die physikalischen Eigenschaften des Bauwerks widerspiegelt. Als Einwirkungen wird für die Ermittlung des Soll-Wertes auf dieses Berechnungsmodell der vorhandene Belastungszustand des Bauwerks eingegeben. Als Rechenmodelle dienen in der Regel **Finite-Element-Modelle** (FE-Modelle), vgl. Kap. 5.1. Dabei kann es sich z. B. um Verformungs- oder Wärmeflussmodelle handeln.

2.5.2.1 Verformungsmodelle

Die Verformungsmodelle erlauben im Gegensatz zu den statistischen Auswerteverfahren eine tiefer gehende Analyse des Stau mauerverformungsverhaltens. Zusätzlich ermöglichen sie den kontinuierlichen Vergleich zwischen gemessenem und rechnerisch erwartetem Verformungsverhalten sowie Aussagen über das Verformungsverhalten des Bauwerks bei noch nicht aufgetretenen Betriebslastfällen. Das Verhalten der Stau mauer kann simuliert werden und liefert damit Sollwerte für die Verformungen. Der Vergleich der an dem Modell errechneten Sollwerte mit den gemessenen Istwerten der Verformung erlaubt eine Beurteilung des Bauwerkszustandes. Durch diese Simulation können auch sehr unwahrscheinliche Einwirkungskombinationen schnell beurteilt werden.

Das Grundprinzip zur Durchführung einer strukturmechanischen Verformungsanalyse ist die Reduktion des realen Bauwerks auf ein idealisiertes Modell, das nur das wesentliche Trag- und Verformungsverhalten widerspiegelt, vgl. [113]. Diese Umsetzung der realen Konstruktion in ein Berechnungsmodell erfolgt in zwei Schritten, der Systemidealisierung und der Auswahl einer geeigneten Berechnungsmethode. Die Idealisierung umfasst die Festlegung des statischen Systems mit den Auflagerbedingungen, der äußeren Einwirkungen wie Temperatur und Wasserstand sowie der Materialkennwerte. Die nachfolgende Auswahl des Rechenverfahrens ist mit der Idealisierung eng verknüpft. So können beispielsweise dünne Tragwerke wie Stabtragwerke auf ihre Systemlinien projiziert und mit den Gleichungen der Stabstatik berechnet werden. Die Strukturanalyse erfordert einen iterativen Prozess, vgl. Abb. 2.6, weil die Ausgangswerte der Idealisierung nur näherungsweise bekannt sind, wie z.B. die Materialeigenschaften. Im Verlauf der Analyse werden sie durch den Vergleich mit den gemessenen Verformungen an die realen Eigenschaften angepasst und optimiert.

Die mechanischen Zusammenhänge zwischen Einwirkungen und Verformungen eines Bauwerkes werden durch die drei Grundgleichungen der Strukturmechanik beschrieben:

- Kinematik (Verformungsgeometrie):

Die Kinematik beschreibt die Beziehung zwischen den resultierenden Verformungen sowie die geometrischen Randbedingungen, d.h. wie die Auflager für das Berechnungsmodell angenommen werden.

- Materialgesetz:

Das Materialgesetz sagt aus, in welcher Beziehung die Spannungen und die Verzerrungen, wie z.B. Dehnung oder Krümmung, zueinander stehen. Es wird zwischen verschiede-

denen Gesetzmäßigkeiten unterschieden, welche die unterschiedlichen Kennwerte des Materials, wie isotrope, anisotrope, homogene, inhomogene, lineare, nichtlineare, elastische, plastische und viskose Eigenschaften, berücksichtigen.

- Gleichgewichtsbedingungen:

Die Gleichgewichtsbedingungen stellen die mathematischen Gleichungen für die Forderung dar, dass ein Bauwerk unter dem Einfluss beliebiger Einwirkungen in einem stabilen Zustand bleibt.

Da die komplexe Geometrie einer Staumauer keine geschlossene analytische Lösung erlaubt, bietet sich zur Berechnung des Strukturmodells die „Finite-Elemente-Methode“ (FEM) an. Nach der analytischen Lösung des Berechnungsmodells muss ein besonderes Augenmerk auf die Kontrolle und Interpretation der Ergebnisse gelegt werden, weil in der Modellerstellung viele Idealisierungen und Annahmen enthalten sind. Ein FEM-Programm bietet zudem zahlreiche Fehlermöglichkeiten für den Anwender wie z. B. bei den verwendeten Einheiten, den aufgetragenen Lasten oder Randbedingungen.

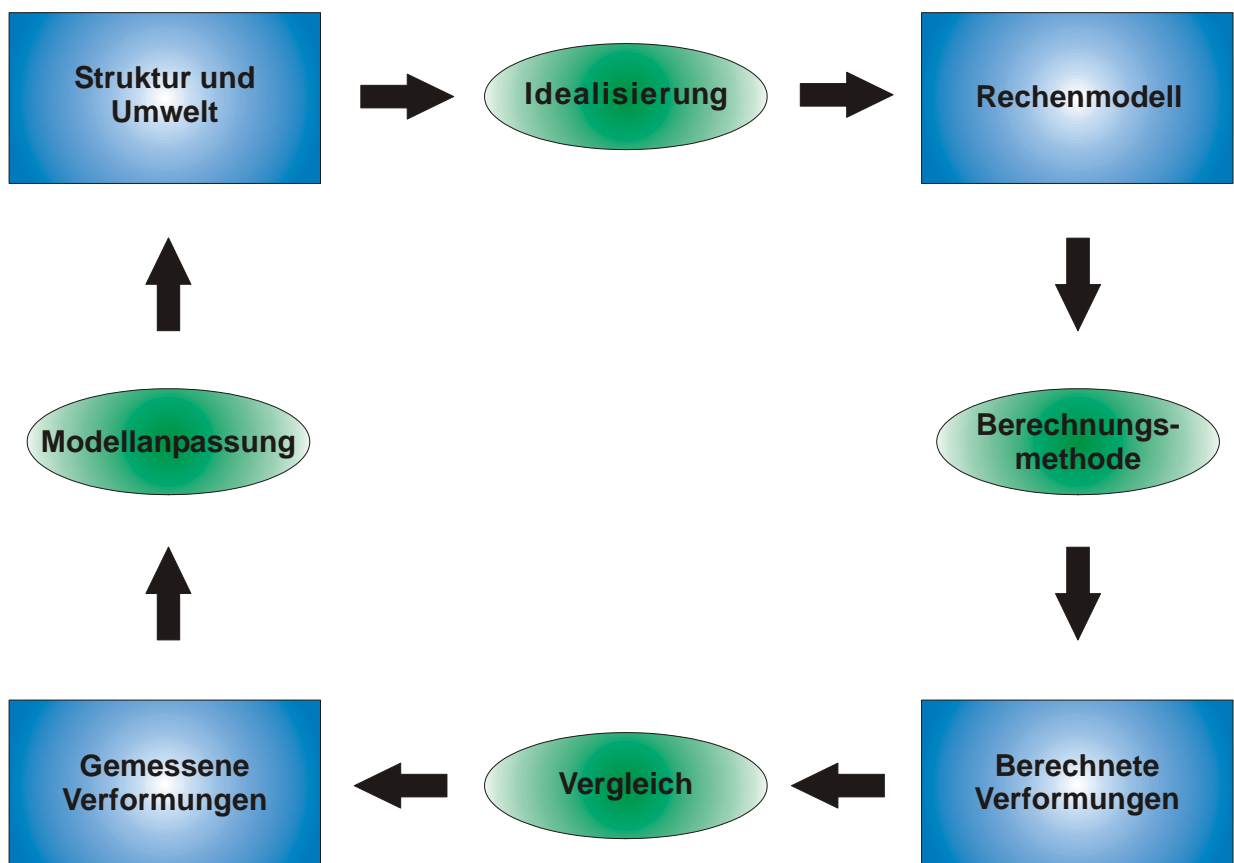


Abb. 2.6: Iterationsprozess in der Strukturmechanik [nach 113]

2.5.2.2 Wärmeflussmodelle

Das Temperaturverformungsverhalten von massiven Bauwerken ist, wie in Kap. 2.2.3 bereits erläutert, vom zeitlichen Verlauf der thermischen Belastung abhängig. Danach kann nicht direkt von der Umgebungstemperatur auf den Verformungszustand geschlossen werden. Um die temperaturbedingten Verformungen mit Hilfe des Verformungsmodells zu berechnen, muss die Temperaturverteilung zu jedem beliebigen Zeitpunkt im Bauwerk bekannt sein. Rechnerisch kann dies mit Hilfe eines transienten Wärmeflussmodells erfolgen.

Das Grundprinzip zur Durchführung einer Temperaturfeldberechnung ist dem Vorgehen für eine strukturmechanische Verformungsberechnung sehr ähnlich. Auch hier wird das reale Bauwerk auf ein idealisiertes Modell reduziert. Erfolgt im Anschluss an die Temperaturfeldberechnung noch eine Verformungsberechnung, wird im Allgemeinen nur ein Geometriemodell für beide Berechnungsaufgaben verwendet. Anstelle der statischen Auflagerbedingungen werden für das Wärmeflussmodell entsprechende Randbedingungen aufgebracht, z.B. Wärmeströme oder Temperaturrandbedingungen.

Für die Temperaturfeldberechnung müssen die folgenden drei Gleichungen für das Material, die Geometrie und die Energiebilanz berücksichtigt werden.

- Materialverhalten:

Das Materialverhalten wird durch die Wärmeleitfähigkeit λ repräsentiert, die bei einer Temperaturdifferenz zwischen zwei Positionen zu einem Wärmetransport führt.

- Geometrie:

Die Geometrie legt die Verteilung von unterschiedlichen Materialien und die Anordnung der thermischen Randbedingungen im Raum fest.

- Energiebilanz:

Die Energiebilanz stellt die mathematische Gleichung für die Forderung des ersten Hauptsatzes der Thermodynamik dar. Das Prinzip der Energieerhaltung besagt, dass bei jedem Vorgang in einem abgeschlossenen System die Energie erhalten bleibt. Sie kann nur von einer Form in eine andere umgewandelt werden.

Wie schon für das Verformungsmodell sind für das Wärmeflussmodell die Ausgangswerte der Idealisierung, wie z.B. die Wärmeleitfähigkeit, nur näherungsweise bekannt. Der Optimierungsprozess verläuft wie bereits in Kap. 2.5.2.1 beschrieben.

Die komplexe Geometrie einer Staumauer sowie der zeitabhängige Prozess erlauben keine geschlossene analytische Lösung für das Wärmeflussmodell, so dass sich auch hierbei eine FEM-Lösung anbietet.

3 Untersuchte Staumauer

Das Hauptabsperrbauwerk der Okertalsperre wurde sowohl durch umfangreiche Messungen als auch analytisch mit Hilfe eines FE-Modells im Hinblick auf sein Verformungsverhalten unter Betriebsbedingungen detailliert untersucht. Für das Verständnis dieser Untersuchungen werden nachfolgend das Bauwerk und seine Konstruktion beschrieben, weiterführende Angaben liefern [2], [29], [64] und [153] bis [155].

3.1 Die Okertalsperre

Die Okertalsperre liegt im nördlichen Teil des Westharzes, vgl. Abb. 3.1, und wird als eine von 6 großen Talsperren im Westharz von der Harzwasserwerke GmbH in Hildesheim betrieben. Die Okertalsperre charakterisiert sich durch ihr besonderes Hauptabsperrbauwerk, eine Bogenstaumauer mit aufgesetzter Schwergewichtsmauer. Diese außergewöhnliche Konstruktionsform existiert weltweit nur wenige Male. Das Absperrbauwerk der Okertalsperre wurde an einer besonders engen Stelle des Okerflusses gebaut, welche die Talabriegelung durch eine 75 m hohe und nur 240 m lange Staumauer ermöglichte. Die wesentlichen technischen Daten über die Okertalsperre sind Tab. 3.1 zu entnehmen.



Abb. 3.1: Lage der Okertalsperre [64]

Technische Daten der Okertalsperre		
Gestautes Gewässer: Oker		
Zweck: <ul style="list-style-type: none"> • Trinkwasseraufbereitung und Fernwasserversorgung • Hochwasserschutz • Niedrigwasseraufhöhung • Energieerzeugung 		
Bauzeit: <ul style="list-style-type: none"> • ab 1938 Beginn der Vorbereitungen zum Bau der Okertalsperre • Unterbrechung durch den 2. Weltkrieg • Bau der Okertalsperre von 1952 bis 1956 • Inbetriebnahme 1956 		
Hydrologie: <ul style="list-style-type: none"> • Einzugsgebiet 85,00 km² • Jahresabflusssumme 75,00 Mio. m³ 		
Staubecken: <ul style="list-style-type: none"> • Höchstes Stauziel 417,00 m ü. NN • Stauziel 416,60 m ü. NN • Absenkziel 383,17 m ü. NN • Tiefstes Absenkziel 358,00 m ü. NN • Gesamtstauraum 48,27 Mio. m³ • Stauraum 47,37 Mio. m³ • Nutzraum <ul style="list-style-type: none"> • Außergew. HW-Rückhalteraum 0,90 Mio. m³ • Gewöhl. HW-Rückhalteraum 1,50 - 4,00 Mio. m³ • Betriebsraum 40,35 - 37,85 Mio. m³ • Reserveraum 5,47 Mio. m³ • Totraum 0,05 Mio. m³ • Speicheroberfläche (Stauoberfläche bei höchstem Stauziel) 2,25 km² • Ausbaugrad (Stauraum/Jahresabflusssumme) 0,63 		
Nutzung: <ul style="list-style-type: none"> • Ausbauleistung 4,14 MW • mittleres Jahresarbeitsvermögen 10,20 GWh • mittlere jährliche Abgabe zur Abflusserhöhung 51,00 Mio. m³ • mittlere jährliche Entnahme für die Wasserversorgung 24,00 Mio. m³ 		
Absperrbauwerk: <ul style="list-style-type: none"> • Höhe über Gründungssohle 75,00 m • Höhe über Talsohle 67,00 m • Kronenlänge 260,00 m • Kronenbreite 8,00 m • Bauwerksvolumen 140.000 m³ • Bauwerksvolumen/Gesamtstauraum 1: 345 • Freibord 1,20 m • Baustoff Grobrüttelbeton • eingebrachtes Betonvolumen 138.000 m³ • Probestau 1 Jahr 		

Tab. 3.1: Technische Daten der Okertalsperre [nach 64]

3.2 Konstruktion und Besonderheiten

Im Jahr 1938 wurde mit vorbereitenden Arbeiten für den Bau der Okertalsperre begonnen. Aufgrund der guten Erfahrungen mit der nahe gelegenen Eckertalsperre, sah die ursprüngliche Planung für das Absperrbauwerk eine Schwergewichtsmauer aus Beton vor. Mit Beginn des 2. Weltkrieges wurden die Arbeiten an der Okertalsperre eingestellt. Nach Beendigung des Krieges sollte der Bau der Talsperre unter geänderten Randbedingungen zu Ende geführt werden. Nach dem Krieg musste besonders wirtschaftlich und preiswert gebaut werden. Für die einst geplante Variante der Gewichtsmauer wären 220.000 m^3 Beton und eine längere Bauzeit erforderlich gewesen als für die ausgeführte kombinierte Bogengewichtsmauer, für die in der Planung 120.000 m^3 Beton vorgesehen waren, deren Ausführung jedoch aufgrund der umfangreichen Spreng- und Abbrucharbeiten 138.000 m^3 Beton erforderte. Weiterhin wurden nach damals neuen Erkenntnissen Schwergewichtsmauern nicht als sicherste Talsperrenform eingestuft, da reine Schwergewichtsmauern bei großen Höhen erhebliche Abmessungen erhalten. Aufgrund der großen Abmessungen bereitet die Ableitung der Abbindewärme Schwierigkeiten und es besteht die Gefahr der Bildung von Schwindrissen.

Aufgrund dieser neuen Voraussetzungen wurden verschiedene Entwurfsvarianten vom Erdamm über Bogengewichtsmauern, kombinierte Mauern bis zur reinen Bogenstaumauer für das Absperrbauwerk untersucht. Zur Ausschreibung kam unter Beachtung aller Aspekte eine Bogengewichtsmauer aus Beton. Die Arbeitsgemeinschaft Dyckerhoff & Widmann, Holzmann und Hochtief gab aufgrund der angetroffenen geologischen Verhältnisse ein Angebot für einen eigenen, abgewandelten Entwurf einer Bogenmauer mit aufgesetzter Gewichtsmauer ab, der dann auch zur Ausführung kam, vgl. Abb. 3.2.

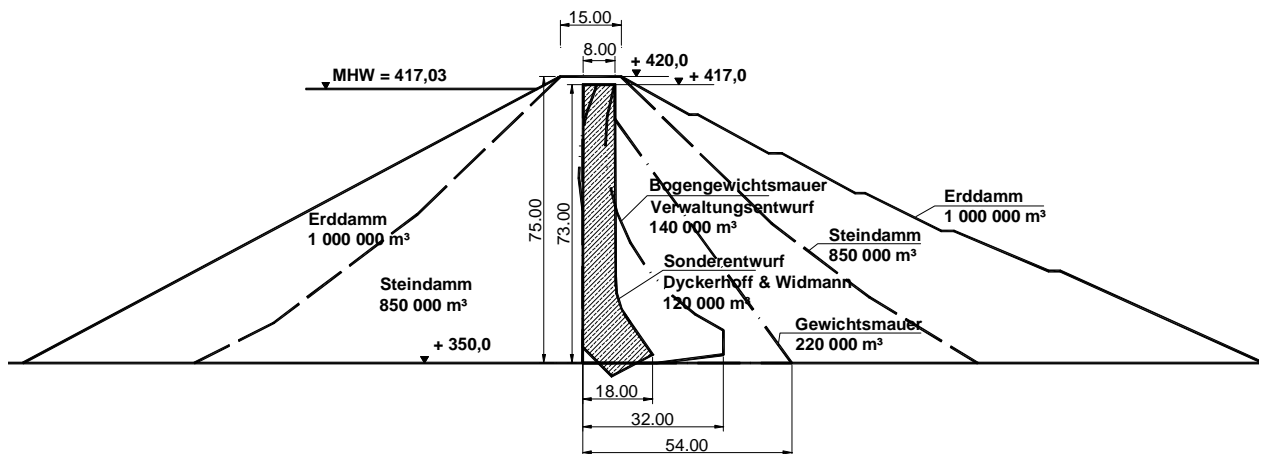


Abb. 3.2: Planungsvarianten für das Hauptabsperrbauwerk der Okertalsperre [nach 155]

3.2.1 Geologie am Staubecken und an der Sperrenstelle

Die nachfolgend beschriebenen geologischen Verhältnisse am Staubecken und an der Sperrenstelle beruhen auf dem Gutachten von Prof. Dahlgrün [29] aus dem Jahr 1952, das der Planung zugrunde lag.

Im Bereich des Staubeckens besteht der Untergrund fast ausschließlich aus Gesteinen des Kulms, Tonschiefer und Grauwacken, wobei die Tonschiefer sehr stark überwiegen. Die Ton-

schiefer sind als völlig dichte Gesteine einzuordnen, die kein nennenswertes Porenvolumen aufweisen. In den gering anstehenden Grauwacken können dagegen in gewissem Umfang Wasserzirkulationen auftreten. Die geologische Beschaffenheit der anstehenden Gesteine, die keine nennenswerten Wasserverluste erwarten lässt, wurde insgesamt als gut geeignet für ein Staubecken beurteilt.

Die Talenge am Juliusstau, die als Sperrenstelle gewählt wurde, weist vorrangig kulmische Tonschiefer auf, vgl. Abb. 3.3. Nur der Westhang zeigt einen geteilten Baugrund, der in drei Bereiche zu unterscheiden ist: Im unteren Abschnitt steht geschlossener Tonschiefer, im mittleren Bereich Tonschiefer mit einigen Grauwackelagen und im oberen Hangabschnitt fast geschlossene Grauwacke an. Die Grauwacke ist stark zerklüftet, aber mit einer festen, guten Beschaffenheit. Die hangabwärts folgenden kulmischen Tonschiefer sind durch die Nähe des Okergranits kontaktmetamorph gehärtet, wobei der Grad dieser Metamorphose unterschiedlich ist. In größerer Entfernung von dem Okergranit ist nur eine Härtung der Schiefer vorhanden, die die einzelnen Lagen des Schiefers noch gut erkennen lässt. Mit zunehmender Nähe zum Granit geht die Umwandlung soweit, dass die einzelnen Schieferlagen miteinander verschweißt und zu einem kompakten Gestein geworden sind, welches als Hornfels bezeichnet wird.

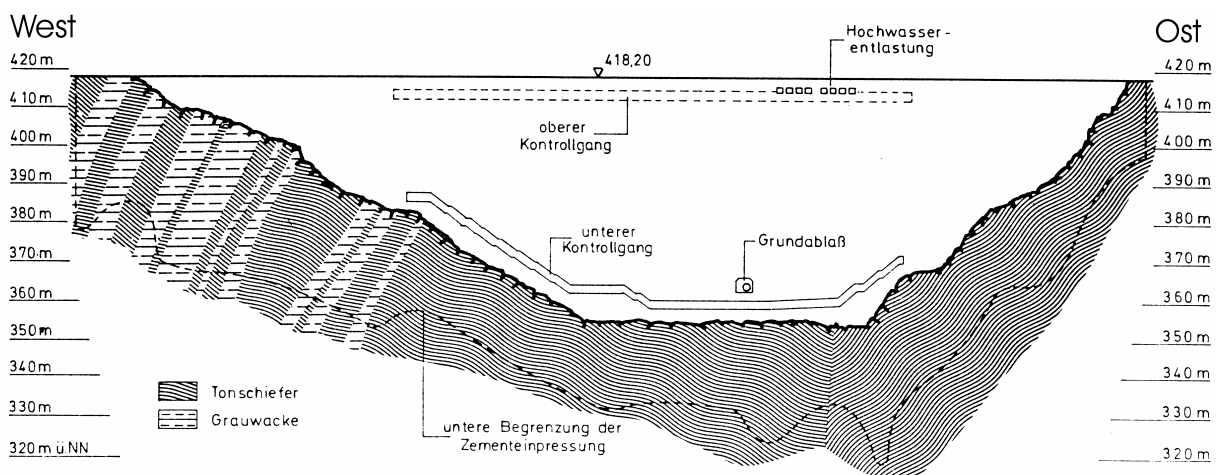


Abb. 3.3: Geologische Verhältnisse im Längsschnitt am Absperrbauwerk der Okertalsperre (Blick von der Wasserseite) [63]

Der Talgrund mit dem Flussbett besteht einheitlich aus Kontaktschiefer und Hornfels.

Der östliche Talhang ist, wie Abb. 3.3 zeigt, deutlich steiler als der westliche und weist homogen von unten bis oben die gleichen Tonschiefer auf wie der untere Abschnitt der Westflanke. Wie am Westhang handelt es sich auch am Osthang um Kontaktschiefer und Hornfels.

Insgesamt wurde das anstehende Gestein geologisch und bautechnisch als fest und gesund eingestuft. Die im Rahmen des Gutachtens durchgeführten Erkundungsbohrungen haben gezeigt, dass der Tonschiefer-Untergrund an der Sperrenstelle bis mindestens 60 m unter die Talsohle reicht.

Die Konstruktion des Absperrbauwerkes trägt der im Vergleich zum Tonschiefer weniger tragfähigen Grauwacke am Westhang, die den sonst einheitlichen Baugrund stört, Rechnung.

Zur Verhinderung von Unterläufigkeiten wurde die Baugrube so tief ausgehoben, dass die Klüfte nahezu geschlossen waren. Zudem verlaufen die Klüfte entweder nahezu parallel zur Mauer oder sind im tieferen Gebirge fast dicht geschlossen. Nur die vorhandenen Klüfte können eine geringfügige Wasserführung im Gebirge ermöglichen, die Gesteine selbst sind nahezu dicht und nehmen fast kein Wasser auf, wie die 1950 durchgeführten Einpressversuche in den Untersuchungsbohrungen gezeigt haben. Durch Verpressung der Bohrlöcher wurden die bis dahin gewonnenen Erkenntnisse bestätigt. Es ergab sich bei den Verpressarbeiten unterhalb von etwa 325 m ü. NN keine Zementaufnahme. Es wurde also nur in den oberen 20 m bis 25 m eine Klüftigkeit festgestellt und das darunter anstehende Gebirge zeigte sich nahezu dicht und geschlossen.

3.2.2 Konstruktion der Hauptsperre

Für die Gründung der Staumauer, die aufgrund des beschriebenen Wechsels in der Gesteinsformation am Westhang als kombinierte Bogengewichtsmauer ausgeführt wurde, waren umfangreiche Spreng- und Abbrucharbeiten erforderlich. Der in der Talsohle anstehende Tonschiefer wurde für den ungefähr 20 m breiten Mauerfuß ca. 7 m tief ausgehoben, während die Einschnitte an beiden Hängen bis zu 24 m gesprengt werden mussten. Insgesamt mussten ca. 75.000 m³ Fels in 15 Monaten ausgehoben werden.

Der Untergrund der Talsperre wurde durch Schleier- und Haftbohrungen gedichtet. Der zweireihige, wasserseitige Dichtungsschleier mit Bohrlochentfernungen bis zu 2 m in einem Reihenabstand bis zu 1 m besteht aus 261 Bohrlöchern. Diese wurden im Tonschiefer bis zu 35 m tief und in der Grauwacke bis zu 50 m tief gebohrt. Der erstellte Schleier erforderte ungefähr 400 t Zement, wobei die Zementaufnahme, so wie es nach dem geologischen Gutachten zu erwarten war, in der Grauwacke am größten war. Über der Gründungsfläche wurden zudem zur Baugrundverbesserung und -abdichtung Heftbohrungen ausgeführt, die in mehreren Arbeitsschritten niedergebracht und anschließend unter Auflast verpresst wurden.

Die insgesamt 75 m hohe und 138.000 m³ Beton umfassende Staumauer teilt sich statisch in die untere 62 m hohe zylindrische Bogenmauer und die darauf aufgesetzte 13 m hohe Gewichtsmauer, vgl. Abb. 3.4. Die Bogenmauer, die von der Talsperrensohle bis zu einer Höhe von 405 m ü. NN reicht, ist oben 8 m breit und hat einen Krümmungsradius von 74 m bei einem Öffnungswinkel von 110°. Bis zum Mauerfuß verbreitert sich die Mauer auf 19 m. Die auf die Bogenmauer aufgesetzten Gewichtsblöcke sind mit Ausnahme des Widerlagerbereichs auf der gesamten Länge der Bogenmauer angeordnet und haben eine einheitliche Dicke von 8 m. Die Fugen zwischen den einzelnen Blöcken im Gewichtsmauerteil wurden nicht gegeneinander verpresst, sondern nur gedichtet. Demgegenüber wurden die Blockfugen im Bogenmauerteil zur Erzielung einer vollen Gewölbewirkung verpresst.

Das Absperrbauwerk verfügt über einen oberen und einen unteren Kontrollgang. Der obere Kontrollgang befindet sich im Mittel ca. 3,50 m unter der Oberkante der Sperrmauer und der untere Kontrollgang verläuft ungefähr parallel zur Talsperrensohle, vgl. Abb. 3.3. Die Kontrollgänge sind jeweils an den Blockfugen durch Schächte mit einem Durchmesser von 1 m miteinander verbunden.

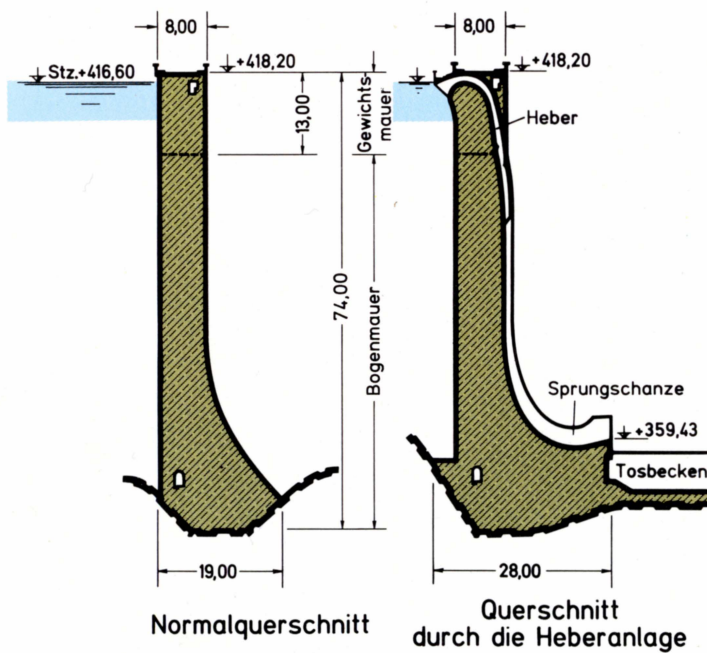


Abb. 3.4: Querschnitt durch die kombinierte Bogengewichtsmauer [64]

Wie im Lageplan zu erkennen ist, vgl. Abb. 3.5, setzen am Bogenmauerbeginn rechtwinklig zum Gewölbe Gewichtsmauern an. Diese Flügelmauern riegeln die von der Bogenmauer nicht abgeschlossenen Talabschnitte hangseitig im Osten und Westen ab. Diese Gewichtsmauern sind durch Raumfugen von der Bogenmauer getrennt und halten den Wasserdruck von den Bogenwiderlagern ab.

Die beschriebene Konstruktion trägt der unterschiedlichen Beschaffenheit des Baugrundes und den dadurch zu erwartenden unterschiedlichen Deformationen Rechnung. Der untere Mauerteil trägt den Wasserdruck durch Bogengewölbe ab, während der Wasserdruck im oberen Teil ausschließlich durch das Eigengewicht der aufgesetzten Betonmauer in die Bogenmauer und so in den festen Talgrund übertragen wird. Der Bogenschub wird ausschließlich in den festgelagerten Tonschiefer übertragen. Im oberen Hangbereich, in dem teilweise die weniger tragfähige Grauwacke ansteht, müssen durch die Konstruktion als Gewichtsmauer keine Bogenschubkräfte abgetragen werden, da durch die Fugenausbildung eine Kraftübertragung in die Hänge ausgeschlossen ist.

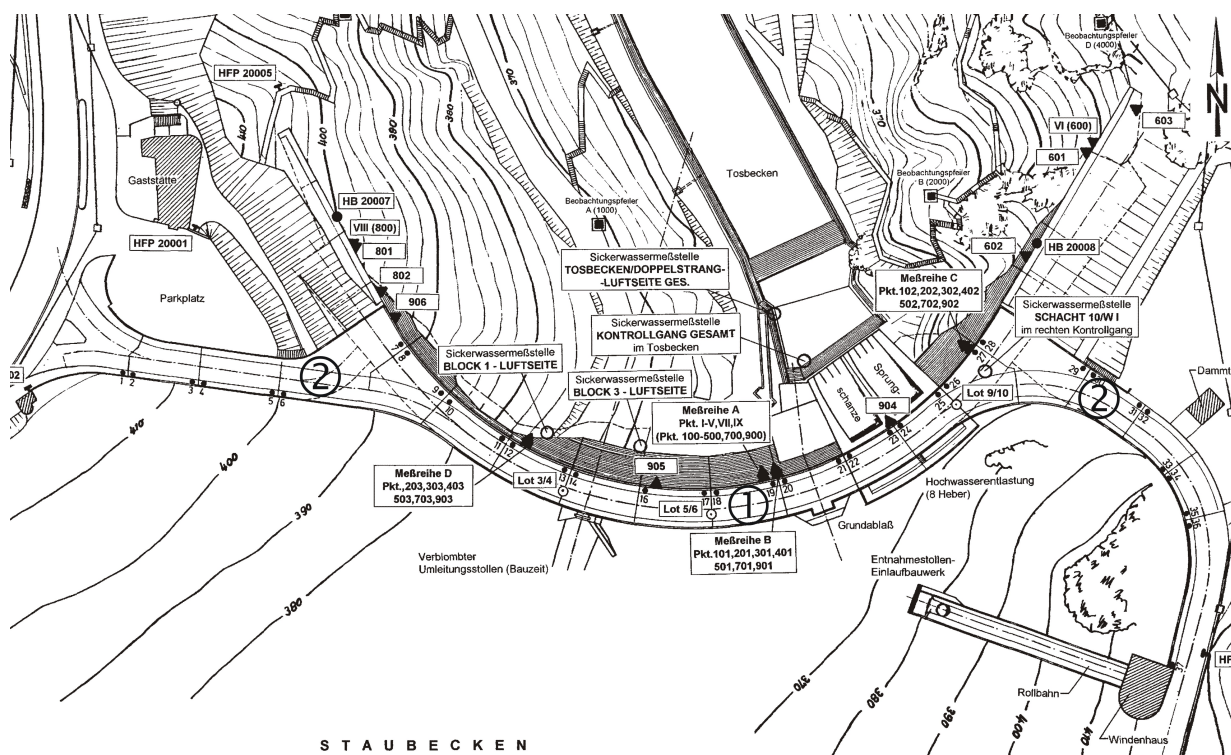


Abb. 3.5: Lageplan der Okertalsperre [63],

- ① Bogenstaumauer mit aufgesetzter Schwergewichtsmauer,
- ② Flügelmauern

3.2.3 Der Talsperrenbeton

Neben der konstruktiven Besonderheit ist auch die Herstellung der Staumauer aus unbewehrtem, zementarmen Rüttelgrobbleton ein außergewöhnliches Merkmal der Okertalsperre. Rüttelgrobbleton zeichnet sich dadurch aus, dass in einen Beton von geeignetem Kornaufbau Grobzuschläge in Form von Bruchsteinen in einem gesonderten Arbeitsgang eingebracht und eingrüttelt werden.

Für den Talsperrenbeton war eine Betongüte eines B300 gefordert. Diese Klassifizierung entspricht der heutigen Bezeichnung C25/30. Zur Reduzierung der Abbindewärme und der Schwindspannungen wurde eine Betonrezeptur mit einem geringen Zementgehalt von 165 kg pro m³ fertigem Beton verwendet. Durch den Einsatz von Hochofenzement wurden ein langsamer Abbindeprozess und eine geringe Temperaturerhöhung infolge Abbindens von nur 12°C erreicht. Dem Feinbeton wurde zudem ein plastifizierendes, luftporenbildendes Zusatzmittel zur Verringerung des erforderlichen Wasserzementfaktors und zur Erhöhung der Frostbeständigkeit zugegeben. Damit war ein geringer w/z-Faktor von 0,51 möglich, der zu einer Erhöhung der Festigkeit und der Wasserundurchlässigkeit führte. Die hohe Festigkeit und Wasserundurchlässigkeit wurden auch durch den hohen Grobsteinanteil aus Diabas, der 45 bis 50 Vol. % vom Grobbeton beträgt, erreicht. Die Erhöhung des Elastizitätsmoduls durch die Diabaseinlagen zeigt der Vergleich der mittleren Elastizitätsmoduln, die anhand von Probewürfeln von 1 m Kantenlänge ermittelt wurden und für den Feinbeton 25.600 N/mm² bzw. für den Grobbeton 41.100 N/mm² betragen. Die Untersuchung von zylindrischen Probekörpern mit einem Durchmesser von 2 m und einer Höhe von 1,50 m ergab einen mittleren Elastizitätsmodul des Rüttelgrobbe-

tons von 36.700 N/mm^2 . Die Druckfestigkeit des Betons wurde bei den untersuchten Würfeln von 1 m Kantenlänge mit etwa 31 N/mm^2 bestimmt. Maßgeblich für die Güte des Rüttelgrobbetons war neben der Rezeptur auch der Herstellungsvorgang. Der Feinbeton, der als Zuschlagstoffe nur Sand und Kies enthält, wurde in etwa 20 cm dicker Schicht in das Bauwerk gepumpt. Auf diese Feinbetonschicht wurden die Grobsteine, die mit einem Durchmesser von 15 bis 60 cm im Diabasbruch am nahe gelegenen Hunekopf gewonnen wurden, etwa 40 cm hoch aufgeschüttet und mit Hilfe von Hochfrequenzrüttlern in den Feinbeton eingerüttelt. Dieser blockweise durchgeführte Vorgang wurde so oft wiederholt, bis die täglich zu betonierende Blockhöhe von 2,50 m erreicht war. Das entspricht einer durchschnittlichen täglichen Betonierleistung von etwa 350 m^3 Grobbeton. Insgesamt wurden rund 70.000 m^3 Feinbeton und 200.000 t Diabassteine für die eingebrachten 138.000 m^3 Rüttelgrob beton verarbeitet.

Die Arbeitsfugen wurden mit besonderer Sorgfalt bearbeitet, d.h. die Schlämpeschicht wurde mit Abbruchhämmern abgespitzt und die Grobsteine wurden teilweise freigelegt, um eine gute Verzahnung zu erzielen. Die auf diese Weise vorbereitete Arbeitsfuge wurde noch mit Druckluft und Wasser abgespritzt, bevor der nächste Abschnitt betoniert wurde.

Die Blockfugenentfernung beträgt maximal 14,80 m. Bei dem Betoniervorgang wurden Schläuche an den Fugen eingelegt, so dass im Beton Kanäle für den Verpressvorgang verblieben. Vor dem ersten Stau wurden die Fugen im Bogenmauerteil zur Erzielung einer vollen Gewölbewirkung ausgepresst. Die Blockfugen sind zudem wasserseitig mit einer Dichtung aus Kupferblech und luftseitig mit Sika-Fugenbanddichtungen versehen. Im Gewichtsmauerteil sind die Fugen nur gedichtet, der verbleibende Hohlraum zwischen den Blöcken soll eine Kraftübertragung auf den benachbarten Block unterbinden. Die unterschiedliche Ausbildung der Blockfugen im Bogen- und Gewichtsmauerteil zeigt Abb. 3.6.

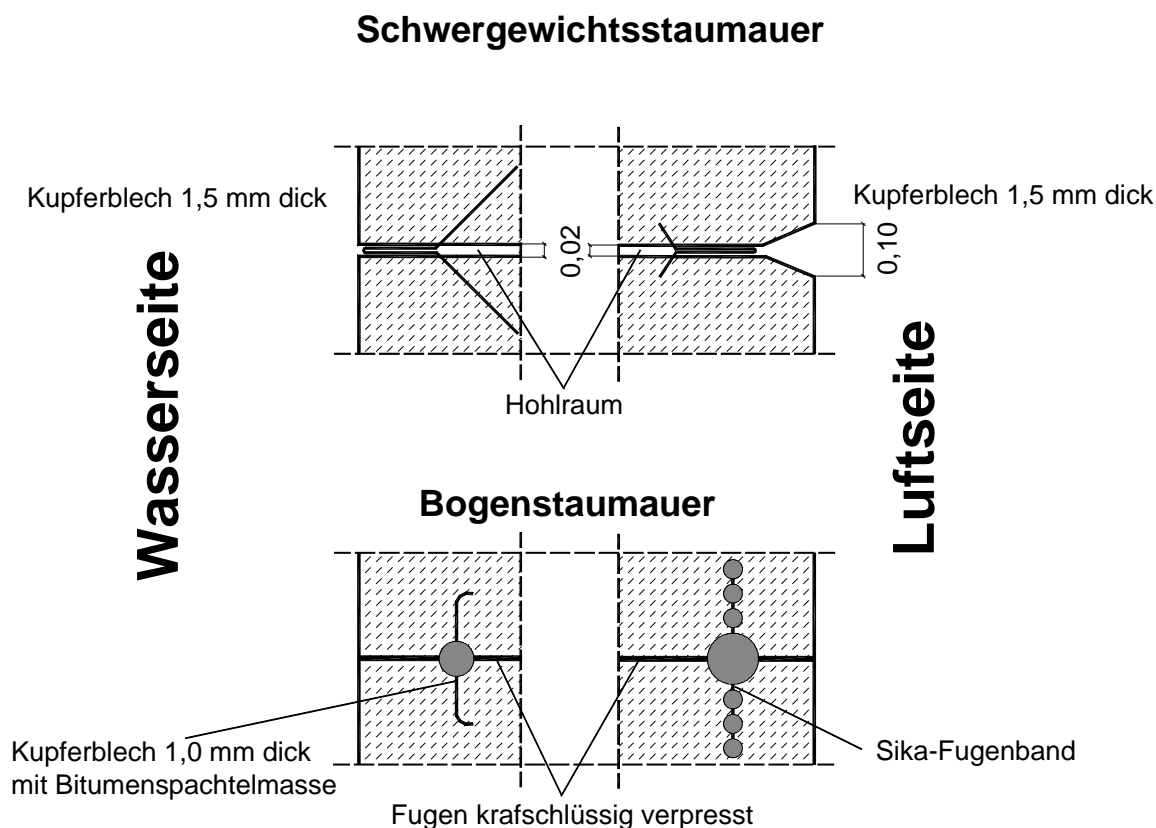


Abb. 3.6: Unterschiedliche Blockfugenausbildung im Gewichts- und Bogenmauerteil [nach 63]

4 Messkonzept und Messergebnisse der Okertalsperre

4.1 Messkonzept und Realisierung

Für die nachfolgende Beschreibung des Messkonzepts (vgl. auch [22] und [43]), der Messergebnisse und des Berechnungsmodells in den folgenden Kapiteln wird die Nummerierung der Blöcke der Okerstaumauer, die beim Bau der Staumauer festgelegt wurde, zugrunde gelegt, vgl. Abb. 4.15. Die Blöcke der Okerstaumauer tragen von Westen nach Osten fortlaufende Nummern von 1 bis 10. Die Widerlagerbereiche der Bogenstaumauer sind separat mit den Bezeichnungen WI bis WIII für das östliche Widerlager sowie WIV und WV für das westliche Widerlager versehen. Die Blockbezeichnung S_i kennzeichnet die Flügelmauern gemäß Abb. 3.5. Entsprechend kennzeichnen beispielsweise die Angaben „Schacht 5/6“ den Schacht zwischen den Blöcken 5 und 6 und „Fuge 5/6“ die Fuge zwischen den genannten Blöcken.

4.1.1 Mess- und Kontrolleinrichtungen der Harzwasserwerke GmbH

Die Harzwasserwerke GmbH betreibt im Rahmen der gemäß DIN 19700 Teil 11 vorgeschriebenen Überwachungsmessungen für Stauanlagen folgende physikalische Messsysteme an der Okertalsperre: Pendellotsysteme in drei Schächten, Sickerwassermessungen im unteren Kontrollgang und am Mauerfuß, automatische Stauhöhen-, Niederschlags- und Lufttemperaturmessungen. Für die physikalischen Überwachungsmessungen wird bei den Harzwasserwerken ein eigenes automatisches Talsperreninformationssystem (TALIS) bei der Datenerhebung und Auswertung eingesetzt. Somit können alle für die Talsperrensteuerung notwendigen Parameter zentral und zeitnah überwacht werden. In das Talsperreninformationssystem sind sowohl die diversen automatischen Sensoren als auch die manuellen Messsysteme über Datenerfassungsmasken eingebunden.

Vor Inbetriebnahme der Staumauer im Jahr 1956 wurden in den Schächten 3/4, 5/6 und 9/10 Schwimmlote zur Erfassung der Neigungsbewegung der Staumauer installiert, vgl. Abb. 4.15. Die Lotaufhängung befindet sich in Höhe des oberen Kontrollgangs, während das Lotgewicht in Höhe des unteren Kontrollgangs zur Dämpfung in einem mit Öl gefüllten Gefäß pendelt. Der Lotdraht richtet sich entlang der wirkenden Schwerkraft aus und ist unabhängig von Umgebungseinflüssen wie beispielsweise Temperatur-, Feuchtigkeits- oder Luftdruckänderungen. Die Einrichtung für die wöchentliche manuelle Ablesung ist an der jeweiligen Schachtwand im unteren Kontrollgang montiert. Die Ableseeinrichtungen bestehen aus einem Lineal, auf das durch eine gegenüberliegende Lichtquelle der Lotschatten projiziert wird.

Bei dem Bau der Staumauer wurden Messgeber der Firma Maihak, die nach dem Schwingsaitenmessverfahren arbeiten, für verschiedene Messaufgaben eingebaut. An der Gründungssohle wurden für die Sohlenwasserdruckmessungen MDS75-Geber verwendet. Ein Mauerquerschnitt wurde für die Betontemperaturmessung mit MDS59-Sensoren und für die Betondehnungsmessung mit MDS3-Sensoren bestückt. Die Anordnung der Sensoren zeigt Abb. 4.1. Die Messungen mit den Maihak-Gebern wurden im Laufe der Betriebszeit eingestellt und 1997 reaktiviert. Ergänzend wird seit Ende 1998 ein Wassertemperaturprofil durch neue Maihaksensoren erfasst. Mit den Schwingsaitensensoren wird analog im Wochenzyklus gemessen. Die Messwerte

Zusätzlich zu den physikalischen Messungen führt die Harzwasserwerke GmbH seit Inbetriebnahme der Okertalsperre jährlich zwei geodätische Deformationsmessungen durch. Zur Ermittlung der Verschiebung, Kippung und Verformung am Hauptabsperrbauwerk werden an der luftseitigen Sperrmaueroberfläche in mehreren Messprofilen geodätische Lagemessungen mit einem Präzisionstachymeter durchgeführt. Setzungsmessungen an der Maueroberkante, am Mauerfuß und an den Flügelmauern ergänzen das geodätische Messprogramm.

Das von der Harzwasserwerke GmbH betriebene Netz aus Messstellen und Sensoren reicht zum Nachweis der Betriebs- und Standsicherheit des Bauwerkes aus. Für die detaillierte Untersuchung und das Verständnis des Verformungsverhaltens der Staumauer im Betriebszustand wurden die in Kap. 4.1.2 beschriebenen Messsysteme ergänzt.

4.1.1.1 Eingesetzte Maihak-Messgeber nach dem Schwingsaitenmessverfahren

Für die Temperaturmessungen werden Schwingsaitenaufnehmer eingesetzt, vgl. [54]. Sie stellen eine Kombination aus mechanischen und elektrischen Aufnehmern dar. Das von der Firma Maihak entwickelte Messprinzip nutzt die Eigenfrequenz einer schwingfähig im Messaufnehmer eingespannten Messsaite, die sich entsprechend der Dehnungsänderung an der Bauteiloberfläche verändert. Dehnungen bzw. Stauchungen im Bauwerk oder äußere Einwirkungen, die über eine elastische Verformung der Membran oder des Aufnehmergehäuses übertragen werden, beeinflussen die Vorspannung der Messsaite. Dadurch verändert sich auf die Frequenz, mit der sie schwingt. Vom Empfangsgerät wird über das Elektromagnetsystem die Messsaite angeregt. Die im Magnetfeld eines Elektromagnetsystems schwingende Saite erzeugt wiederum in der Magnetspule eine elektrische Schwingung gleicher Frequenz, die über ein Kabel auf das Empfangsgerät übertragen und dort zu einem Messwert weiterverarbeitet wird. Die Saitenfrequenz f in Hertz ergibt sich aus der Formel

$$f = C \cdot \sqrt{\varepsilon} . \quad [4.1]$$

Die Messkonstante C ist durch die Länge, Dichte und Elastizität der Saite festgelegt. Die Dehnungsänderung ε der Saite ist maßgebend für die Frequenzänderung und proportional zur Messgröße.

Da nur die Frequenz, nicht aber die Amplitude der Schwingung den Messwert bestimmt, können Veränderungen elektrischer Größen auf dem Übertragungsweg, wie beispielsweise Kabel- und Kontaktwiderstände oder Spannungsschwankungen, den Messwert nicht beeinflussen. Daher sind auch Messwertübertragungen über lange Strecken ohne Beeinträchtigung der Messergebnisse möglich.

Bei Temperaturmessungen mit der schwingenden Saite erfährt die eingespannte Saite in Abhängigkeit vom Material bzw. Wärmeausdehnungskoeffizienten der Messsaite durch die Temperaturänderung eine Dehnungsänderung. Die Einflüsse aus Temperaturdehnungen des Bauteils müssen durch Kalibrierfaktoren korrigiert werden, wenn das Bauteil einen anderen Wärmeausdehnungskoeffizienten als die Messsaite hat.

Je nach Messaufgabe werden Systeme mit intermittierend, vgl. Abb. 4.2, oder dauerschwingender Messsaite, vgl. Abb. 4.3, verwendet.

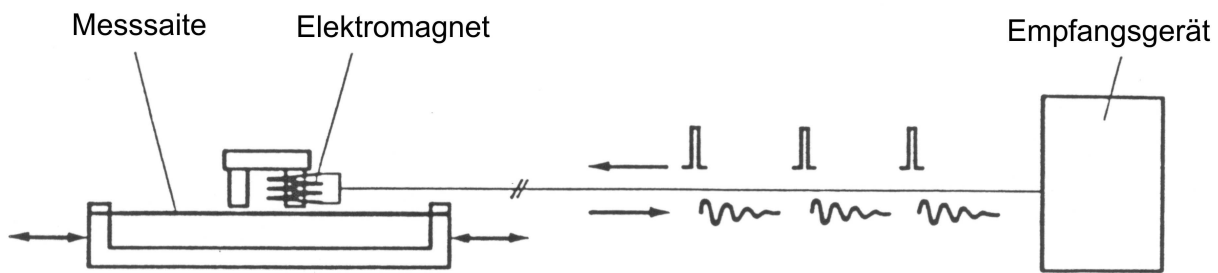


Abb. 4.2: Intermittierend schwingende Saite für statische und quasi-statische Messungen [54]

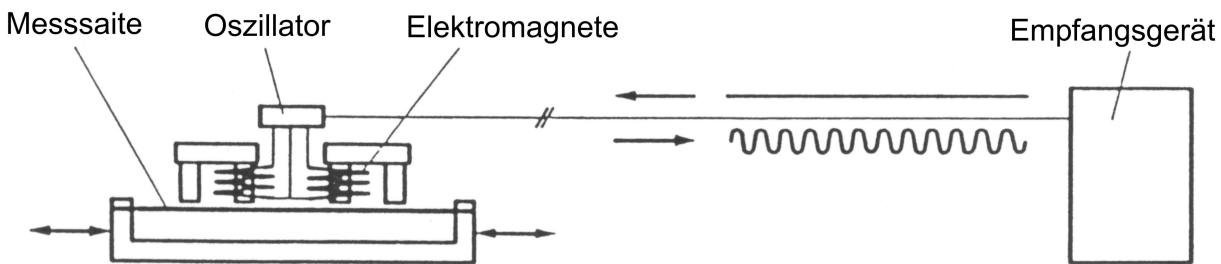


Abb. 4.3: Dauerschwingende Messsaite für statische und dynamische Messungen [54]

Bei der intermittierend schwingenden Messsaite wird diese in einstellbaren Intervallen durch einen Gleichstromimpuls vom Empfängergerät zur Schwingung angeregt. Die Messung erfolgt während des Ausschlagens der Messsaite.

Bei der dauerschwingenden Saite dagegen wird die Saite fortlaufend durch einen Oszillator zur Schwingung angeregt, der wiederum vom Empfängergerät gespeist wird. Von den zwei Elektromagneten in dem System erregt einer die Messsaite permanent (Erreger), während der andere fortlaufend die induzierten Schwingungen aufnimmt (Generator).

Neben der Temperaturmessung finden die auf Schwingsaiten-Basis arbeitenden Messwertgeber auch häufig bei der Messung von Dehnungen, Spannungen, Drücken oder Kräften Anwendung.

Bei der vorliegenden Messaufgabe wird der Messwertaufnehmer für die Messung der Wassertemperaturen direkt auf der wasserseitigen Oberfläche der Staumauer befestigt oder für die Betontemperaturen in das Massivbauwerk einbetoniert bzw. nachträglich in Kernbohrungen eingebaut, die anschließend durch Injektionen wieder verschlossen werden. Es handelt sich um intermittierende Schwingsaitengeber.

4.1.2 Messeinrichtungen des Instituts für Geotechnik und Markscheidewesen

Die untersuchte Fragestellung der vorliegenden Arbeit entstand bei der Durchführung von Sensortests für ein Forschungsvorhaben. Es sollten die Praxistauglichkeit und das Langzeitverhalten der Testsensoren im Messalltag geprüft werden. Als Referenzsensor wurde der Nivel 20 der Firma Leica ausgewählt und als Messobjekt diente das Hauptabsperrbauwerk der Okertalsperre. Ende Juni 1999 wurden entsprechend dem Prüfkonzept neben den Testsensoren drei Nivel 20 in dem oberen Kontrollgang der Staumauer an den Fugen 3/4, 5/6 und 9/10 eingebaut. Bei

den Auswertungen der Messwerte stellte sich die Frage nach dem Verformungsverhalten des Absperrbauwerkes unter Betriebsbedingungen, das hauptsächlich auf den Einfluss des Wasserstandes und der Temperatur zurückzuführen ist. Die Messergebnisse der Nivel 20 wurden daher hinsichtlich der Eignung der Nivel 20 für die neue Fragestellung betrachtet. Zudem wurde der Aufbau einer Fernwartung des Messsystems getestet. Die Messergebnisse der Harzwasserwerke GmbH wurden dem IGMC zur Verfügung gestellt, so dass keine Doppelmessungen stattfanden. Für das erweiterte Messkonzept war zu beachten, dass die Messgeräte nur in den beiden Kontrollgängen oder aufwendiger in den vorhandenen Kontrollschächten eingebaut werden konnten. Wäre der Einbau der Messgeräte beim Bau der Staumauer geplant gewesen, dann wäre das Messkonzept so ausgelegt worden, dass alle für die Verformungsanalyse erforderlichen Größen gemessen worden wären. Die Einschränkungen bei den durchführbaren Messungen wurden durch das erstellte FE-Modell kompensiert. Die Ergänzung des Messsystems vom IGMC erfolgte in zwei Schritten. Zum 1. November 1999 wurde das Messsystem durch zwei Nivel 20, vier Fugenmessgeräte und eine Inklinometermessstrecke erweitert. Im November 2000 konnten weitere vier Nivel 20 installiert werden.

Bevor das Messkonzept und die Konfiguration des Gesamtsystems erläutert werden, wird ein Überblick über die eingesetzten Messgeber, ihre technischen Daten und ihr Funktionsprinzip gegeben. Besondere Anforderungen sind dabei an die auszuwählenden Messgeräte und den Aufbau des Messsystems bis hin zur Messwerterfassung gestellt worden, da in Sperrmauern nach den Erfahrungen der Harzwasserwerke GmbH ein aggressives Mikroklima herrscht, welches schon wiederholt zum Ausfall von Messsystemen geführt hat.

4.1.2.1 Eingesetzte Messgeräte

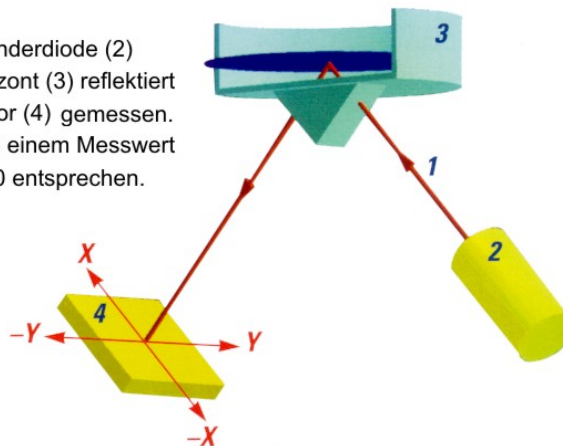
4.1.2.1.1 Nivel 20 der Firma Leica

Für die Erfassung der geringen Staumauerverformungen sind die Nivel 20 aufgrund ihrer hohen Auflösung gut geeignet. Zudem ermöglichen die Nivel 20 kontinuierliche, automatisierte Neigungsmessungen in einem BUS-System.

Ein Nivel 20 erfasst zweiaxial Neigungswerte und die Sensortemperatur. Der verwendete Neigungssensor arbeitet nach einem optoelektronischen Prinzip, vgl. Abb. 4.4, und enthält daher keinerlei mechanisch bewegte Komponenten.

Als Bezugsebene dient ein Flüssigkeitshorizont, der absolut rechtwinklig zur Gravitationsachse steht. Je nach Neigungen des Messobjektes verändern sich die Winkel zwischen Sensor und Bezugsebene. Diese Winkeländerungen werden mit einem positionsempfindlichen Photodetektor gemessen und im Sensor wahlweise zu digitalen oder analogen Ausgangssignalen aufbereitet. Bei einem Arbeitsbereich von ± 2 mrad ($\sim 0,115^\circ$) und einem Messbereich von $\pm 1,5$ mrad ($0,09^\circ$) erzielt der Nivel 20 bei einer Betriebstemperatur von -20° bis $+50^\circ\text{C}$ eine Genauigkeit von $\pm 0,005$ mrad ($\sim 0,00006^\circ$).

Der Lichtstrahl (1) der Senderdiode (2) wird vom Flüssigkeitshorizont (3) reflektiert und auf dem Photodetektor (4) gemessen. Dieser Nullzustand würde einem Messwert von $X=0.000$ und $Y=0.000$ entsprechen.



Bei einer Sensorneigung verändert sich die Lage der kompletten Sensoreinheit gegenüber dem Flüssigkeitshorizont (3). Diese Neigungsänderung würde einem Messwert von $X=0.050$ und $Y=0.200$ entsprechen.

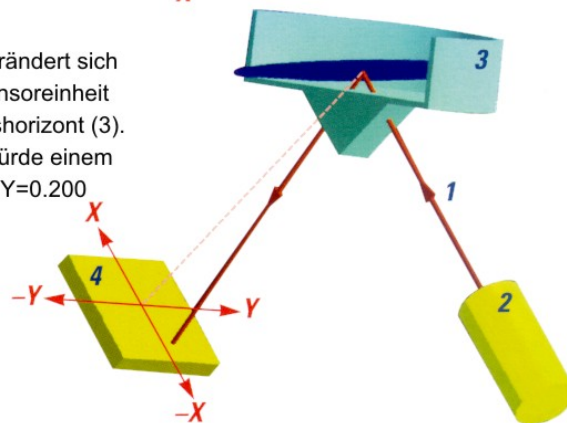


Abb. 4.4: Funktionsprinzip des Nivel 20 der Firma Leica [101]

Für die digitale Ausführungsvariante kann zwischen einem RS-232 und einem RS-485 Datenausgang gewählt werden. Das Nivel 20-BUS-System wird über die RS-232-Schnittstelle an dem Messwerterfassungsrechner angeschlossen. Bis zu 32 Neigungssensoren können in einem BUS-System betrieben werden. Die Systemkonfiguration für ein BUS-System mit fünf Nivel 20 ist in Abb. 4.5 dargestellt.

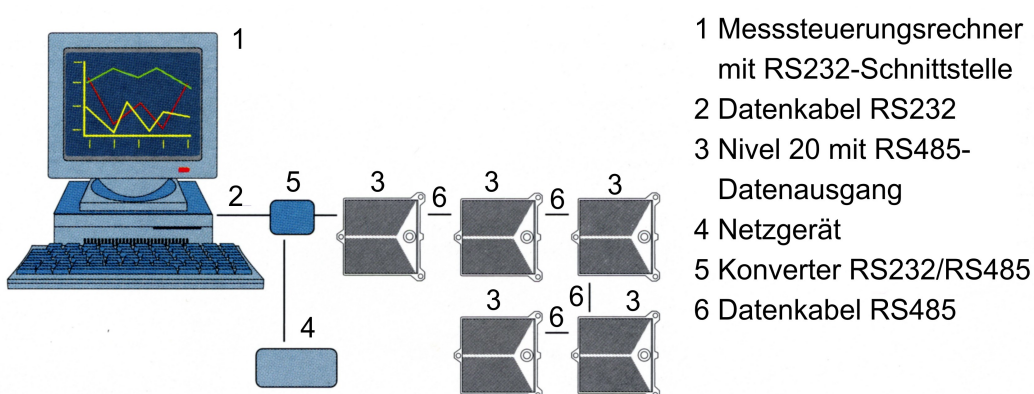


Abb. 4.5: Systemkonfiguration für einen Nivel 20-Messaufbau [101]

Mit Hilfe der Software „Nivel Track“ der Firma Leica lassen sich die Nivel 20 konfigurieren. Die Messwerte werden als Absolutwerte permanent mit dem PC erfasst und dort im ASCII-Format gespeichert. Die Startzeit einzelner Messungen und die Messintervalle werden ebenfalls mit Hilfe des Programms festgelegt. Bei dem Start einer Messwertaufzeichnung öffnet das Leica-Programm das Menü aus Abb. 4.6, in dem der Anwender alle erforderlichen Vorgaben für die Messung treffen kann.

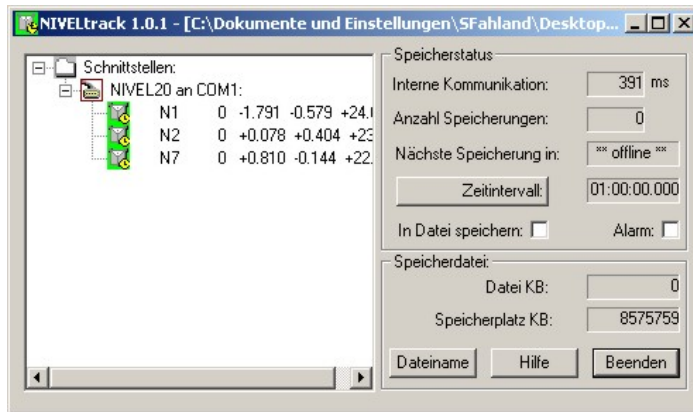


Abb. 4.6: Software „Nivel Track“ der Firma Leica

4.1.2.1.2 Inklinometersonde NMGD der Firma Glötzl

Mit der zweiaxialen Inklinometersonde NMGD von Glötzl können Bohrloch- oder Bauwerksverformungen in einem speziell dafür einzubauenden Messrohr schrittweise durch einen Polygonzug ermittelt werden, vgl. Abb. 4.11. Bei dem Messvorgang wird das Neigungsmessrohr, das als Führungsrohr für die Inklinometersonde dient, von unten nach oben abgefahren. In jedem Messschritt erfasst die wahlweise 0,5 m oder 1 m lange Sonde den Neigungswinkel zwischen der Vertikalen und der Sondenlage in zwei zueinander senkrecht stehenden Messebenen, vgl. Abb. 4.7. Im zweiten Schritt wird eine Umschlagsmessung mit der um 180° gedrehten Sonde durchgeführt. Den räumlichen Verlauf des Neigungsmessrohres erhält man durch Summation der Messwerte. Durch den Vergleich der Messlinien zweier Zeitpunkte können die Verformungen des Rohres ermittelt werden. Damit sind auch die Verformungen des Bohrlochs bzw. des Bauwerks bekannt. Die Biegelinie kann aus den gemessenen Neigungen ermittelt werden.

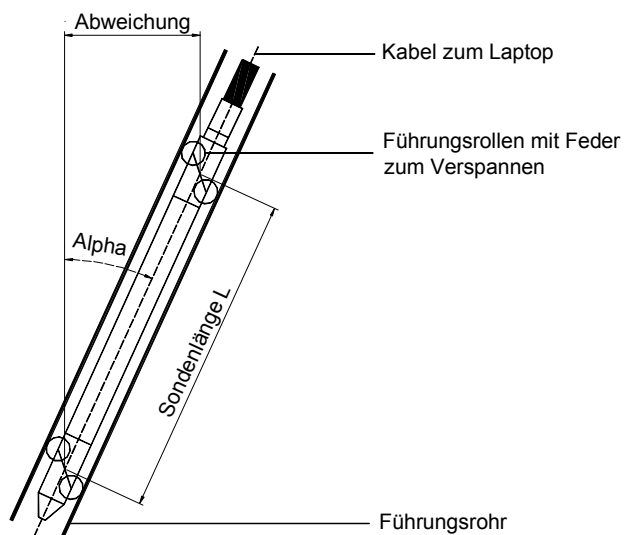


Abb. 4.7: Aufbau der Inklinometersonde [nach 56]

Der Messwertaufnehmer der Inklinometersonde besteht aus einem hochpräzisen scheibenförmigen Feder-Masse-System mit einer Lagerung, die nur Bewegungen in eine Richtung zulässt. Wird die Bewegungs- und Messachse des Systems in Richtung des Gravitationsvektors gelegt, wird die volle Erdbeschleunigung gemessen. Senkrecht zu diesem Vektor wird keine Erdbeschleunigung gemessen.

schleunigung gemessen. Das Ausgangssignal des Aufnehmers ist proportional dem Sinus des Neigungswinkels zur vertikalen Achse. Die analogen Sensormesswerte werden in der Sonde mit einem Controller digital gewandelt, be- und verrechnet. Die Ausgabe und Speicherung der Messwerte, deren Angabe als Sinus des Neigungswinkels oder als horizontale Abweichung (mm/Schritt) erfolgt, wird über die Software „GLNP“ der Firma Glötzl vorgenommen. In dem Programm werden vor Messbeginn die erforderlichen Messoptionen eingestellt, vgl. Abb. 4.8. Die Inklinometersonde liefert bei einem Messbereich von $\pm 30^\circ$ eine Messgenauigkeit von $\pm 0,02$ mm/Schritt.

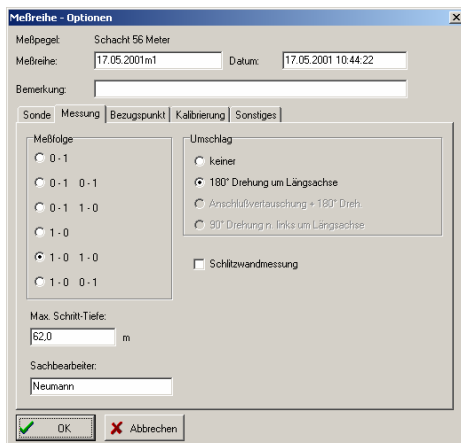


Abb. 4.8: Einstellung der Messoptionen für die Inklinometermessung

4.1.2.1.3 Fissurometer 15/200/80M der Firma Glötzl

Für die Erfassung der räumlichen Bewegung der Fugen zwischen benachbarten Blöcken der Staumauer wurde das in Abb. 4.9 schematisch dargestellte dreidimensionale Fissurometer 15/200/80M von Glötzl aus Edelstahl ausgewählt, das die räumliche Verschiebung von zwei Bauwerksteilen gegeneinander erfasst. Die Verschiebungen in die drei zueinander orthogonalen Richtungen x, y und z werden mit drei hochauflösenden resistiven (potentiometrischen) Wegaufnehmern „GWD“ elektrisch erfasst. Der Wegaufnehmer besteht aus einem Leitplastik-Linearpotentiometer auf einem Aluminiumsubstrat. Bei einem Messbereich von bis zu 100 mm wird eine Auflösung von $\pm 0,01$ mm erreicht. Die Wegaufnehmer sind an einem Datalogger angeschlossen, der die Messdaten speichert.

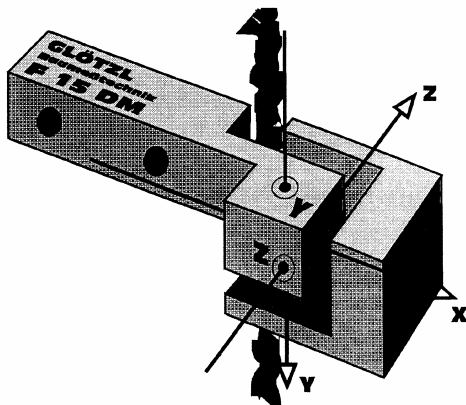


Abb. 4.9: 3D-Fissurometer von Glötzl [56]

4.1.3 Messkonzept zur Erfassung des Verformungsverhaltens der Okertalsperre

Das Messkonzept wurde, sofern es die Randbedingungen erlaubten, entsprechend dem aufgrund der Konstruktion als kombinierte Bogengewichtsmauer zu erwartenden statischen Verhalten auslegt. Mit Hilfe des FE-Modells der Staumauer sollten aus den gemessenen Verformungen Rückschlüsse auf die temperatur- bzw. stauhöheninduzierten Verformungsanteile des Absperrbauwerks getroffen werden. Deshalb waren auf der Seite der Einwirkungen unbedingt die Stauhöhe und die Temperatureinflüsse zu erfassen, da diese beiden Größen das Verformungsverhalten unter Betriebsbedingungen maßgeblich bestimmen. Die Messung dieser Einflussgrößen gehört zu den Standardmessungen für Talsperren und wird, wie bereits erläutert, von der Harzwasserwerke GmbH durchgeführt. Mit den Verformungsmessungen sollte eine Überprüfung des konstruktionsbedingten Verformungsverhaltens erfolgen. Ziel der durchgeführten Untersuchungen war die Beantwortung der Frage: Verhält sich die Kombination aus Schwergewichtsmauer und Bogenstaumauer an der Okertalsperre ähnlich wie ein monolithischer Körper oder erfährt der durch Raumfugen vom Bogenmauerteil getrennte Schwergewichtsteil der Sperrmauer andere und größere Verformungen als die darunter liegende Bogenstaumauer?

Dementsprechend wurde die Anordnung der Messgeber so gewählt, dass die Verformungen schwerpunktmäßig in der Gewichtsmauer sowie in Mauermitte des Gesamtbauwerks gemessen wurden. Die Konzentration der Messgeber in der Gewichtsmauer war erforderlich, um ihr Verformungsverhalten detailliert zu erfassen. Zudem wurden in der Gewichtsmauer im Vergleich zur Bogenmauer die größeren Verformungen erwartet. Im Gesamtbauwerk treten in Mauermitte die größten Verformungen auf, weil dort der Scheitelpunkt der Bogenmauer ist und zudem die größte freie Mauerhöhe vorliegt. Konkret wurden die Messgeber wie folgt angeordnet:

Die Neigungen wurden im oberen Kontrollgang in der Gewichtsmauer permanent an sieben Positionen erfasst, an der Fuge 3/4, Fuge 5/6, Fuge 6/7, Fuge 9/10 und der Fuge 10/WI sowie am Übergang der Gewichtsmauer zur Flügelmauer, der Fuge WI/SI. An der zuletzt genannten Fuge wurden die Neigungsänderungen durch zwei Neigungssensoren erfasst, einer wurde in der Schwergewichtsmauer und einer in der Flügelmauer implementiert, um das Verformungsverhalten an diesem Übergang genau zu erfassen. Die Nivel 20 an der Fuge 6/7, der Fuge 10/WI und die beiden Nivel 20 an der Fuge WI/SI konnten aus finanziellen Gründen erst im Rahmen der Messerweiterung im November 2000 installiert werden. Alle neun eingesetzten Nivel 20 wurden auf speziell für diese Anwendung gefertigten Wandkonsolen montiert. Durch die Ausrichtung der Neigungssensoren wurden jeweils die Neigungsänderungen zur Luft- bzw. Wasserseite, die von vorrangigem Interesse sind, erfasst, vgl. Abb. 4.10. Zusätzlich wurden die Neigungsänderungen in Mauerlängsrichtung automatisch mitregistriert. Die Neigungen wurden über den Steuerungsrechner im Stundenrhythmus abgefragt und aufgezeichnet.

Drei der Nivel 20 lieferten die Messwerte an der gleichen Position wie die einmal wöchentlich abgelesenen Lote der Harzwasserwerke GmbH, so dass zu diesem Zeitpunkt eine Kontrolle der Messwerte erfolgte. Durch dieses Messkonzept wurde ein qualitativer Verlauf der Neigungen über das Längsprofil der Sperrmauer in Höhe des oberen Kontrollganges, der innerhalb der Gewichtsmauer liegt, gewonnen. Den Schwerpunkt der Messungen bildete die Fuge 5/6, die sich etwa in Mitte der Sperrmauer befindet, vgl. Abb. 4.14 und Abb. 4.15. An dieser Stelle wurden zusätzliche Messungen durchgeführt. Im Schacht 5/6 waren neben einem Nivel 20 im oberen Kontrollgang und einem Lot der Harzwasserwerke noch zwei weitere Nivel 20 installiert. Die beiden Neigungssensoren im Schacht befanden sich 16,80 m und 34,40 m unter der Oberkante

der Sohle des oberen Kontrollganges, womit der eine Sensor unterhalb des Überganges vom Schwergewichtsteil zur Bogenstaumauer und der andere ungefähr in halber Höhe der Bogenstaumauer angeordnet waren.

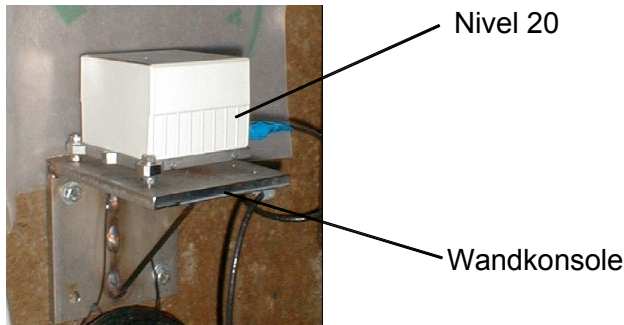


Abb. 4.10: Nivel 20 von Leica am Schacht 5/6 im oberen Kontrollgang der Okertalsperre

Neben den permanent messenden stationären Neigungssensoren wurde Ende Oktober 1999 ein Vierkantedelstahlrohr als Inklinometermessrohr über eine Höhe von 62 m im Schacht 5/6 zwischen dem oberen und unteren Kontrollgang fest eingebaut. Das Messrohr setzt sich aus zwanzig 3-m-Abschnitten und einem 2-m-Stück zusammen und ist jeweils an den Übergängen mit einer Lasche versehen, die die beiden Rohrstücke fest miteinander verbindet und eine starre Befestigung an dem Bauwerk ermöglicht. Von November 1999 bis Januar 2002 wurden in diesem Rohr wöchentlich zweiaxiale Inklinometermessungen mit der Glötzl-Sonde NMGD in Metermessschritten durchgeführt, vgl. Abb. 4.11 und Abb. 4.12. Mit Hilfe dieser Messungen wurden Verformungsprofile des Absperrbauwerks im Schacht 5/6 über die gesamte Höhe in Richtung der Wasser- bzw. Luftseite schrittweise durch einen Polygonzug ermittelt. Durch den Vergleich der Messlinien mit der Nullmessung ergaben sich die zeitlich aufgetretenen Verformungen des Rohres. Damit sind auch die Staumauerverformungen bekannt. Dieses Messprofil ergänzte die permanenten Messungen, die an wenigen ausgewählten Positionen der Sperrmauer stattfanden.

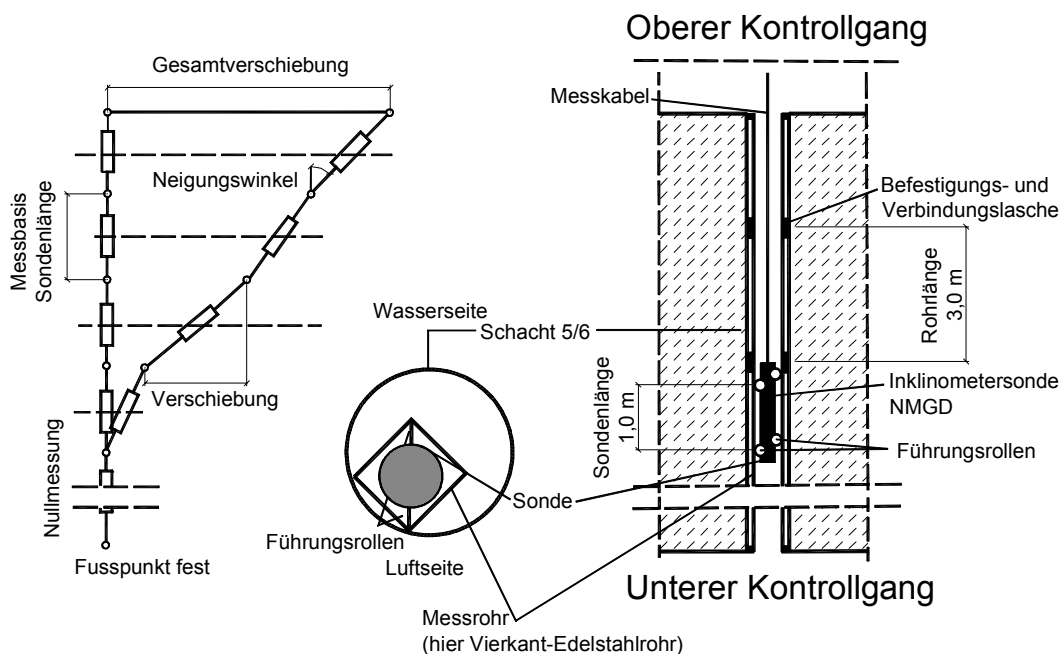


Abb. 4.11: Messverfahren und Einbau im Schacht 5/6 [nach 56]



Abb. 4.12: Inklinometermessung im Schacht 5/6

Außerdem wurden drei 3D-Fissurometer der Firma Glötzl zur Überwachung der räumlichen Fugebewegungen zwischen den benachbarten Blöcken der Staumauer an der Fuge 6/7, Fuge 10/WI und der Fuge WI/SI eingebaut, vgl. Abb. 4.13. An der Fuge 5/6 wurde ein viertes Fugemessgerät des **Geodätischen Instituts der Universität Hannover (GIH)** installiert. Die Verschiebungen in den drei zueinander orthogonalen Richtungen, d.h. zur Wasser- bzw. Luftseite, in Mauerlängsrichtung und in vertikaler Richtung wurden an jeder Fuge permanent im Stundenintervall erfasst und in dem angeschlossenen Datalogger gespeichert.

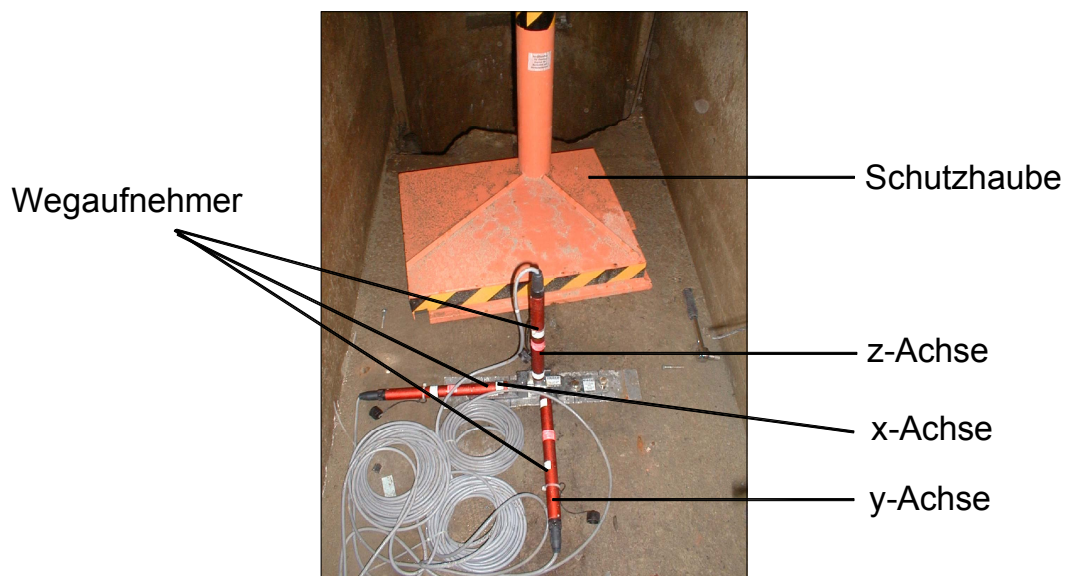


Abb. 4.13: Eingebautes Fissurometer an der Fuge 6/7 Schutzabdeckung im Hintergrund

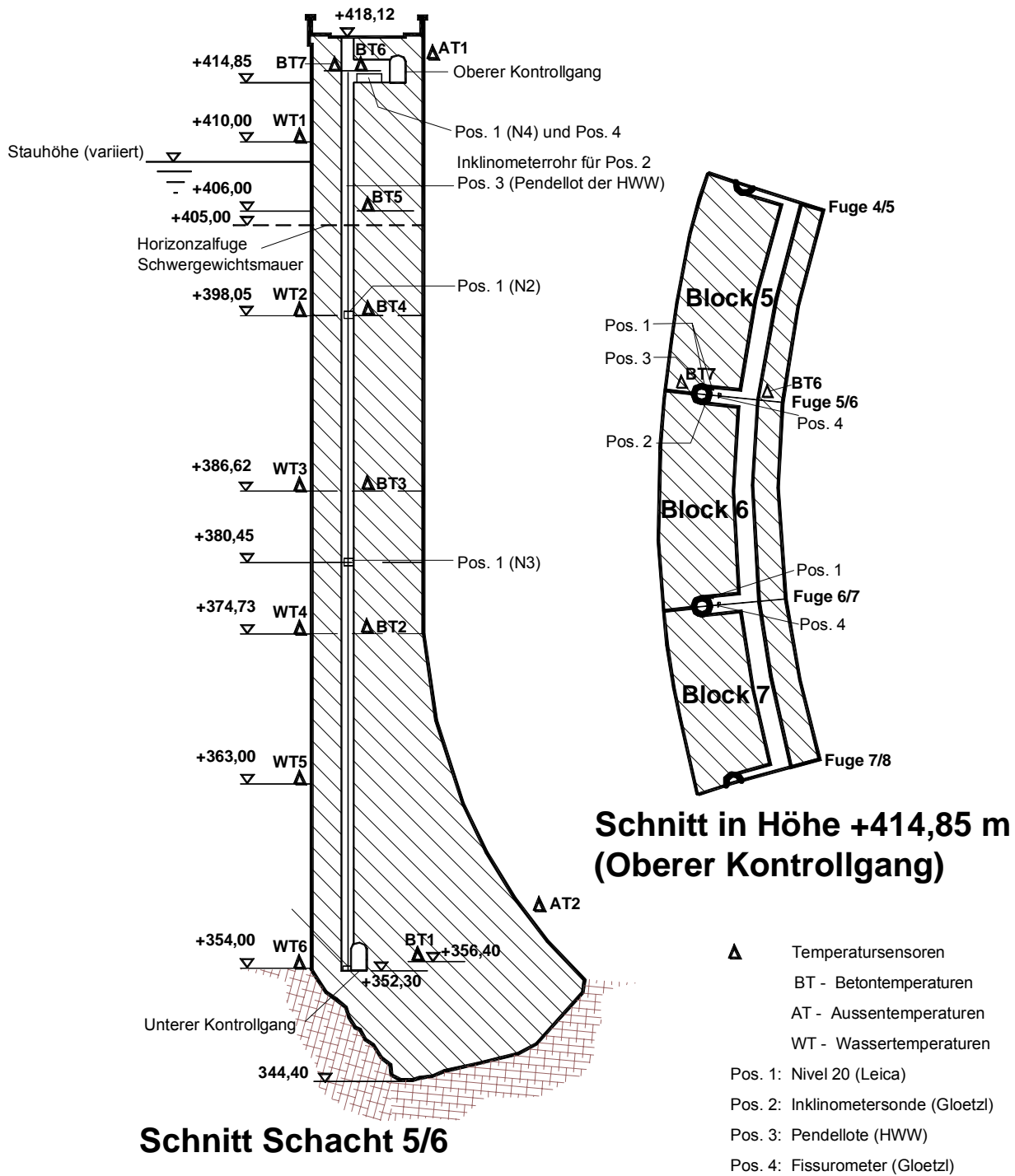


Abb. 4.14: Messanordnung im Schacht 5/6

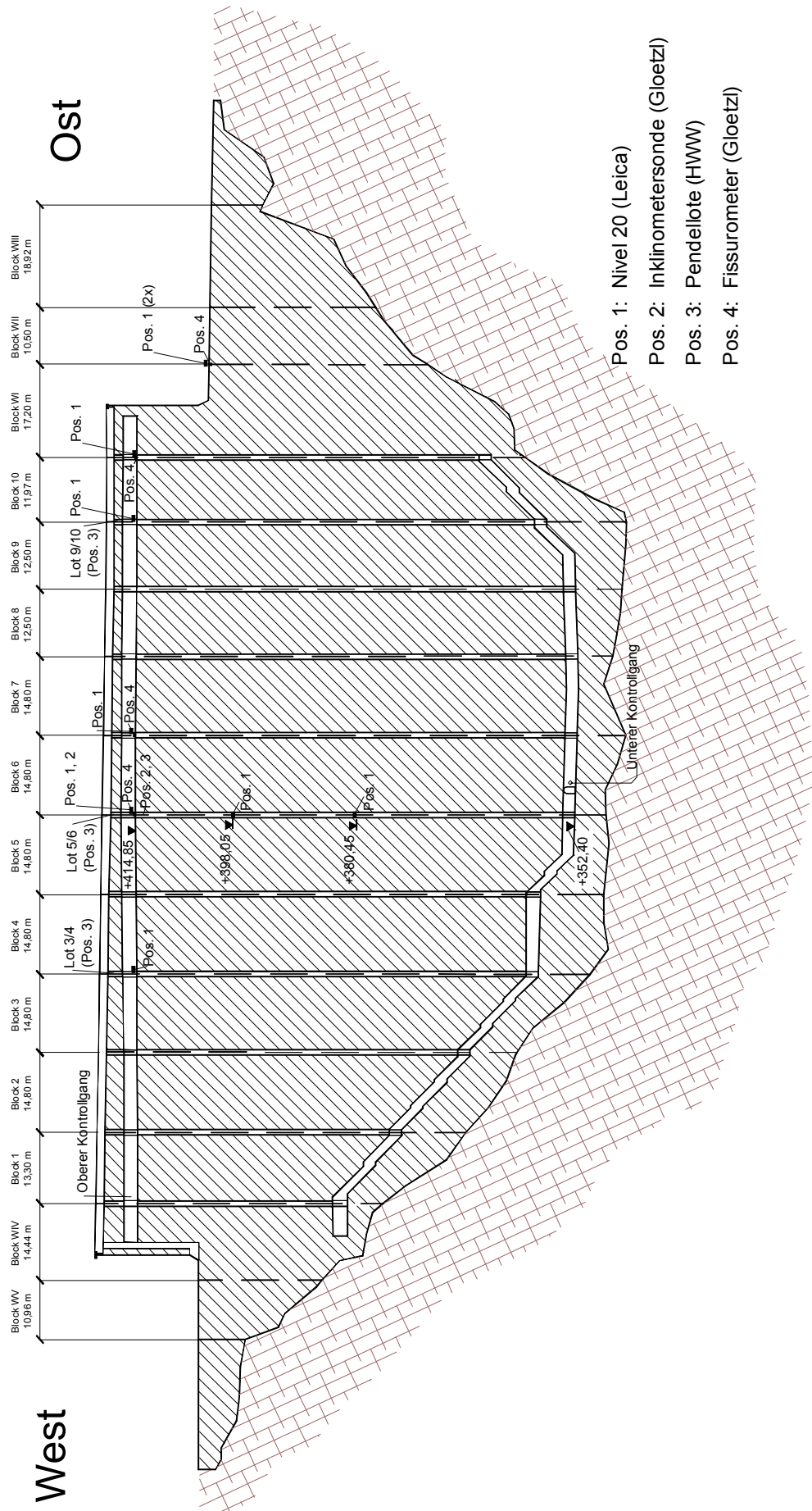


Abb. 4.15: Messanordnung im Längsschnitt der Sperrmauer (Blick von der Wasserseite)

4.1.4 Fernsteuerung der kontinuierlichen Messungen

Die Steuerung der stationären Messsysteme des IGMK sowie die Zwischenspeicherung der Messwerte erfolgten durch einen PC, der im Datenerfassungsraum im oberen Kontrollgang der Okertalsperre aufgestellt war. An den Rechner waren die Nivel 20 über eine serielle RS232-Schnittstelle angeschlossen. Die Messwerte der Fissurometer wurden separat in einem Data-logger aufgezeichnet.

Der Rechner musste für die Umgebungsbedingungen der Sperrmauer ausgelegt werden, das heißt er durfte nicht aufgrund des feuchtkalten Klimas in der Staumauer ausfallen. Zum Schutz wurde der Rechner in eine isolierte Zarges-Box eingebaut. Die Rechneranschlüsse wurden mittels abgedichteten Steckverbindungen durch die Rückwand der Box geführt. In die Zarges-Box wurde eine Heizung mit Temperaturfühler eingebaut, die bei Bedarf in Betrieb gegangen ist, so dass in der Box ein gleichmäßiges Klima von etwa 18 bis 20°C mit entsprechend geringer Luftfeuchtigkeit herrschte, vgl. Abb. 4.16. In der Staumauer war kein Telefonanschluss für den Betrieb eines Modems verfügbar. Aus wirtschaftlichen Gründen entfiel die tägliche Systemkontrolle vor Ort, daher wurde die Datenfernübertragung und Fernsteuerung des Talsperren-PCs per Mobiltelefon gewählt und implementiert.

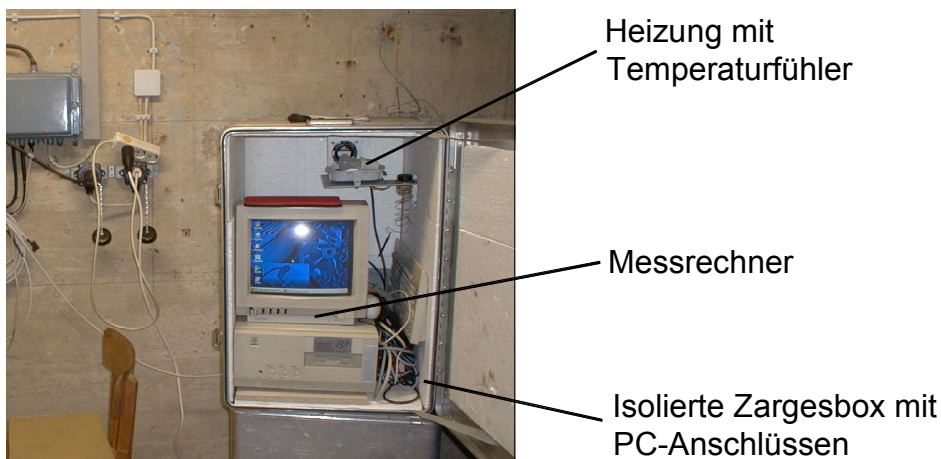


Abb. 4.16: PC im Messwerterfassungsraum der Okertalsperre

Die Verwendung eines Mobiltelefons in Kombination mit entsprechender Software ermöglichte die Fernsteuerung des Systems in der Talsperre sowie die Übertragung der Messdaten zur Auswertung auf einen Rechner im Büro des IGMK, vgl. Abb. 4.17. Der Mobilfunkempfang, der im oberen Kontrollgang unter ca. 3,50 m Beton nicht vorhanden war, wurde durch eine externe Kfz-Antenne, die durch ein Fenster zur Luftseite ca. 0,5 m nach außen geführt wurde, gewährleistet. Bei der Auswahl des Telefons und des Mobilfunkvertrages mussten verschiedene Rahmenbedingungen berücksichtigt werden. Das Telefon musste zur Fernsteuerung des Rechners und zur Datenübertragung geeignet sein, das heißt es musste sich vom PC als „Modem“ ansprechen lassen. Dies wurde durch ein Datenkabel mit entsprechender Software ermöglicht, welches das Telefon mit einer RS232-Schnittstelle des Rechners verbindet. Den gleichzeitigen Anschluss der Autoantenne, der Stromversorgung und des Datenkabels an das Telefon ermöglichte im Frühjahr 1999 nur der Mobilfunktelefonanbieter Nokia. Um den Akku des Telefons nicht durch ständige Ladespannung zu zerstören, wurde eine Zeitschaltuhr zwischengeschaltet. So wurde zweimal täglich für eine halbe Stunde die Akkuladung geschaltet. Der Anschluss des Mobiltelefons an den PC über das Datenkabel musste an die örtlichen Gegebenheiten ange-

passt werden. Der Datenerfassungsraum der Talsperre, in dem der Messsteuerungsrechner stand, und das nächstgelegene Fenster der Sperrmauer sind ca. 60 m voneinander entfernt. Das Antennenkabel kann eine maximale Länge von etwa 2,5 m haben, damit die Empfangsverstärkung garantiert ist. Das Datenkabel, das über die serielle RS-232-Schnittstelle an den PC angeschlossen wird, kann auch nicht die erforderlichen rund 60 m überbrücken. Daher wurden zwei Schnittstellenkonverter integriert, die direkt am Telefon eine Wandlung von RS-232 auf RS-485 und eine umgekehrte Wandlung am Messrechner durchführten. Die Wahl des Mobilfunkvertrages fiel auf einen D1-Datenvertrag bei T-Mobil, da das D1-Netz luftseitig der Talsperre den stärksten Empfang bietet.

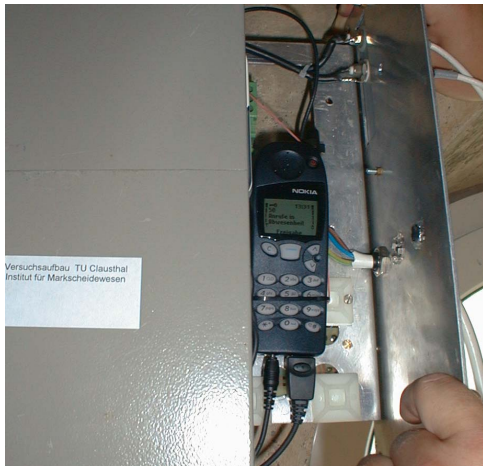


Abb. 4.17: Fernsteuerung und Datentransfer über ein Mobiltelefon

Die Mobilfunktelefonsoftware „Cellulare Data Suite“ von Nokia, die für den Betrieb des Mobilfunktelefons als Modem erforderlich ist, musste mit einer Software zur Rechnerfernsteuerung kompatibel sein. Zudem mussten alle erforderlichen Programme unter einem einheitlichen Betriebssystem lauffähig sein. Bei der Belegung der seriellen Schnittstellen war die Reihenfolge der Zuordnung zu den einzelnen Geräten zu beachten. Die Software für das Mobiltelefon, das über eine serielle Schnittstelle an den PC angeschlossen wird, richtet selbständig eine weitere, virtuelle serielle Schnittstelle ein, über die das Mobilfunktelefon als Modem deklariert wird. Dabei war zu darauf zu achten, dass die virtuelle Schnittstelle nicht die Benennung oder Adressierung einer realen seriellen Schnittstelle verwendet. Nach Gesprächen mit Herstellern und Tests entschied man sich für die Kombination von dem Mobilfunktelefon inklusive der erforderlichen Software mit dem Fernsteuerungsprogramm „Laplink“. „Laplink“ ermöglichte sowohl die komplette Fernsteuerung und Fernwartung des Talsperrenrechners als auch die Datenübertragung über einen Xchange-Dienst. Als Betriebssystem war dafür Windows NT erforderlich. Damit der Remote-Rechner in der Staumauer auch nach einem Stromausfall, der an der Talsperre häufiger auftrat, oder einem erforderlichen Systemneustart weiterhin über das Mobiltelefon zu steuern war, wurde ein automatischer Neustart mit selbstständiger Nutzeranmeldung für den Rechner konfiguriert. Unter NT erforderte dies einen Eintrag in die Registry-Datei, der die Logon-Prozedur automatisiert. Um den Datenverlust bei Stromausfall zu minimieren, wurden durch die entsprechenden Einträge in die Autostart-Konfiguration „Laplink“ und die Programme zur Messwerterfassung mit den letzten Einstellungen automatisch nach dem Neustart des Rechners gestartet. Damit war es möglich, jederzeit die Einstellungen für die laufenden Messungen über die Verbindung Host-Remote-Rechner zu steuern sowie die Messdaten auszulesen und zu übertragen.

Die Messsystemsteuerung und Überwachung wurde entsprechend den heutigen Anforderungen ausgelegt. Eine Übersicht der Umsetzung zeigt Abb. 4.18. Weiter wäre es mit einer Einstellung im Fernsteuerungsprogramm möglich gewesen, dass das Überwachungssystem selbstständig an eine vorgegebene Stelle (z.B. Nachricht auf ein Mobiltelefon oder E-Mail-Benachrichtigung) eine Fehlermeldung oder definierte Grenzwertüberschreitung meldet. Diese Option des Frühwarnsystems wurde hier jedoch deaktiviert, weil es sich bei den Messungen nicht um sicherheitsrelevante Überwachungen handelt.

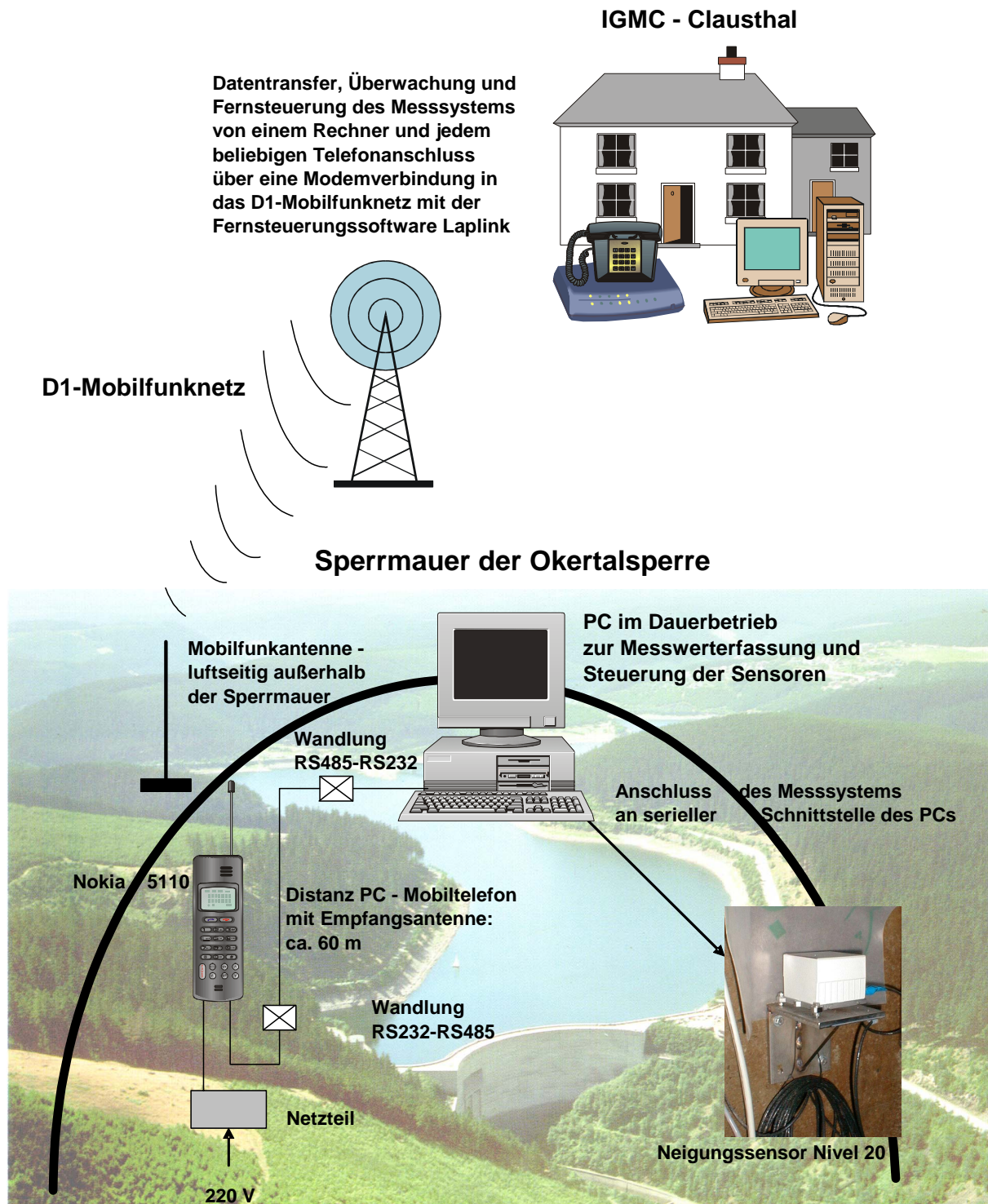


Abb. 4.18: Fernwartung der kontinuierlichen Messungen an der Okertalsperre

4.2 Messergebnisse

4.2.1 Nivel 20

Als Messwerte liefern die Nivel 20 die Neigung in x- und y- Richtung sowie die interne Sensortemperatur, vgl. Abb. 4.19.

Fortlaufende Nr. des Messdatensatzes	Schnittstelle	Sensoradresse	Datum	Uhrzeit	x-Neigung	y-Neigung	Sensortemperatur
00000000	COM3	N1	8/6/2001	09:15:04.359	+0.155	+0.066	+15.3
00000001	COM3	N2	8/6/2001	09:15:04.499	+0.637	-0.141	+09.1
00000002	COM3	N2	8/6/2001	09:15:04.629	+0.042	0.077	+07.7
00000003	COM3	N4	8/6/2001	09:15:04.779	+0.531	+0.036	+15.5
00000004	COM3	N5	8/6/2001	09:15:04.919	+0.686	-0.189	+14.8
00000005	COM3	N6	8/6/2001	09:15:05.060	+0.185	+0.151	+16.4
00000006	COM3	N7	8/6/2001	09:15:05.200	-0.081	+0.555	+15.9
00000007	COM3	N8	8/6/2001	09:15:05.340	+0.298	-0.165	+15.3
00000008	COM3	N9	8/6/2001	09:15:05.480	+0.538	+0.058	+15.3
00000009	COM3	N1	8/6/2001	10:15:05.517	+0.155	+0.066	+15.3
00000010	COM3	N2	8/6/2001	10:15:05.657	+0.638	-0.141	+09.1
00000011	COM3	N3	8/6/2001	10:15:05.797	+0.043	-0.078	+07.7
00000012	COM3	N4	8/6/2001	10:15:05.937	+0.531	+0.036	+15.5
00000013	COM3	N5	8/6/2001	10:15:06.078	+0.685	-0.189	+14.8
00000014	COM3	N6	8/6/2001	10:15:06.218	+0.185	+0.151	+16.4
00000015	COM3	N7	8/6/2001	10:15:06.358	-0.081	+0.556	+15.9
00000016	COM3	N8	8/6/2001	10:15:06.498	+0.298	-0.166	+15.3
00000017	COM3	N9	8/6/2001	10:15:06.638	+0.537	+0.059	+15.3
00000018	COM3	N1	8/6/2001	11:15:06.024	+0.155	+0.066	+15.3
00000019	COM3	N2	8/6/2001	11:15:06.164	+0.638	-0.141	+09.1
00000020	COM3	N3	8/6/2001	11:15:06.304	+0.043	-0.077	+07.7
00000021	COM3	N4	8/6/2001	11:15:06.445	+0.531	+0.036	+15.5
00000022	COM3	N5	8/6/2001	11:15:06.585	+0.685	-0.188	+14.8
00000023	COM3	N6	8/6/2001	11:15:06.725	+0.185	+0.150	+16.4
00000024	COM3	N7	8/6/2001	11:15:06.865	-0.082	+0.555	+15.9
00000025	COM3	N8	8/6/2001	11:15:07.005	+0.297	-0.167	+15.3
00000026	COM3	N9	8/6/2001	11:15:07.146	+0.537	+0.058	+15.3
00000027	COM3	N1	8/6/2001	12:15:06.511	+0.155	+0.066	+15.3
00000028	COM3	N2	8/6/2001	12:15:06.652	+0.638	-0.142	+09.1
00000029	COM3	N3	8/6/2001	12:15:06.792	+0.043	-0.077	+07.7
00000030	COM3	N4	8/6/2001	12:15:06.932	+0.531	+0.036	+15.5
00000031	COM3	N5	8/6/2001	12:15:07.072	+0.684	-0.188	+14.8

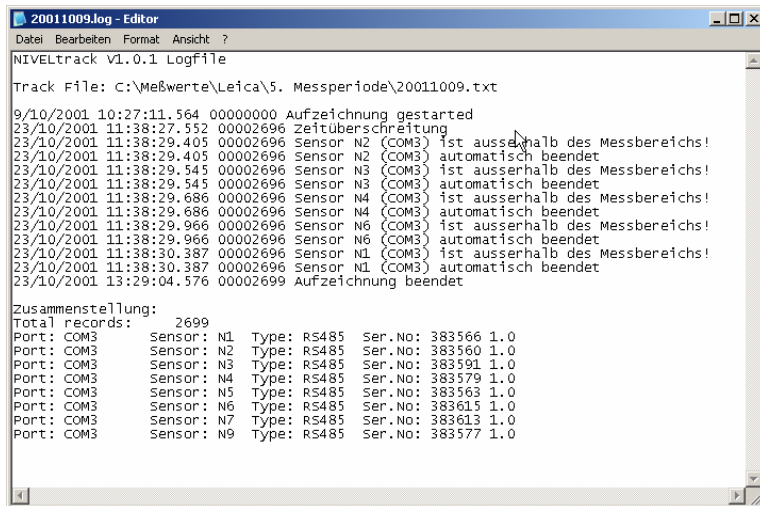
Abb. 4.19: Datenfile mit den Messwerten von neun Nivel 20

Mit dem Start einer Messung erstellt das Leica-Programm ein Log-File mit dem Dateinamen und dem Speicherort der Messdatendatei, die der Anwender vorgegeben hat. Zudem werden der Messbeginn, das Messende, die Anzahl der Datensätze, die Schnittstellenadresse sowie die angeschlossenen Nivel 20 mit ihrer Adresse im BUS-System, der Art des Datenausgangs und ihrer Seriennummer aufgeführt, vgl. Abb. 4.20.

Zusammenstellung:				
Total records:	1512			
Port:	COM3	Sensor:	N1	Type: RS485 Ser.No: 383566 1.0
Port:	COM3	Sensor:	N2	Type: RS485 Ser.No: 383560 1.0
Port:	COM3	Sensor:	N3	Type: RS485 Ser.No: 383591 1.0
Port:	COM3	Sensor:	N4	Type: RS485 Ser.No: 383579 1.0
Port:	COM3	Sensor:	N5	Type: RS485 Ser.No: 383563 1.0
Port:	COM3	Sensor:	N6	Type: RS485 Ser.No: 383612 1.0
Port:	COM3	Sensor:	N7	Type: RS485 Ser.No: 383613 1.0
Port:	COM3	Sensor:	N8	Type: RS485 Ser.No: 383614 1.0
Port:	COM3	Sensor:	N9	Type: RS485 Ser.No: 383615 1.0

Abb. 4.20: Log-File der Nivel 20-Software

Auftretende Fehler und Ausfälle werden ebenfalls im Log-File dokumentiert, Abb. 4.21.



```

20011009.log - Editor
Datei Bearbeiten Format Ansicht ?
NIVELtrack V1.0.1 LogFile
Track File: C:\Meßwerte\Leica\5. Messperiode\20011009.txt

9/10/2001 10:27:11.564 00000000 Aufzeichnung gestartet
23/10/2001 11:38:27.552 00002696 Zeitüberschreitung
23/10/2001 11:38:29.405 00002696 Sensor N2 (COM3) ist ausserhalb des Messbereichs!
23/10/2001 11:38:29.405 00002696 Sensor N2 (COM3) automatisch beendet
23/10/2001 11:38:29.545 00002696 Sensor N3 (COM3) ist ausserhalb des Messbereichs!
23/10/2001 11:38:29.545 00002696 Sensor N3 (COM3) automatisch beendet
23/10/2001 11:38:29.686 00002696 Sensor N4 (COM3) ist ausserhalb des Messbereichs!
23/10/2001 11:38:29.686 00002696 Sensor N4 (COM3) automatisch beendet
23/10/2001 11:38:29.966 00002696 Sensor N6 (COM3) ist ausserhalb des Messbereichs!
23/10/2001 11:38:29.966 00002696 Sensor N6 (COM3) automatisch beendet
23/10/2001 11:38:30.387 00002696 Sensor N1 (COM3) ist ausserhalb des Messbereichs!
23/10/2001 11:38:30.387 00002696 Sensor N1 (COM3) automatisch beendet
23/10/2001 13:29:04.576 00002699 Aufzeichnung beendet

Zusammenstellung:
Total records: 2699
Port: COM3 Sensor: N1 Type: RS485 Ser.No: 383566 1.0
Port: COM3 Sensor: N2 Type: RS485 Ser.No: 383560 1.0
Port: COM3 Sensor: N3 Type: RS485 Ser.No: 383591 1.0
Port: COM3 Sensor: N4 Type: RS485 Ser.No: 383579 1.0
Port: COM3 Sensor: N5 Type: RS485 Ser.No: 383563 1.0
Port: COM3 Sensor: N6 Type: RS485 Ser.No: 383615 1.0
Port: COM3 Sensor: N7 Type: RS485 Ser.No: 383613 1.0
Port: COM3 Sensor: N9 Type: RS485 Ser.No: 383577 1.0
  
```

Abb. 4.21: Log-File der Nivel 20-Software mit Fehlermeldungen

Für die Weiterbearbeitung der Rohdaten wurden die ASCII-Datensätze in Microsoft Excel eingelesen und dort mit Hilfe von Tabellen und Diagrammen ausgewertet.

Aus den stündlich erfassten Neigungsänderungen wurden für die zeitliche Betrachtung der Messwerte Tagesmittel gebildet. Der Stundenrhythmus der Messungen wurde gewählt, um kurzfristige Ereignisse zu erfassen, die eine Mauerverformung bewirken. Bei einer einmaligen Messwerterfassung pro Tag wäre das Messergebnis ein durch den Messzeitpunkt beeinflusster Tageszufallswert, denn die Staumauerverformungen weisen einen Tagesgang auf. Durch die Mittelwertbildung über 24 Stunden erfolgt eine Glättung der Messwerte. Die gemittelten Neigungswerte erlauben dann einen Vergleich mit den anderen Messwerten wie beispielsweise Temperatur, Wasserstand und Lot, die in einem anderen Intervall erfasst wurden. Vor der Mittelwertbildung wurden die Messwerte mit statistischen Verfahren auf Fehler geprüft.

Bei Betrachtungen der Messergebnisse wurden die Neigungen in Mauerlängsrichtung vernachlässigt, obwohl die äußeren Temperatureinwirkungen aufgrund der unsymmetrischen Bauwerksform nachweislich zu Verformungen in dieser Richtung führen. Sie sind aber nicht Bestandteil der durchgeführten Untersuchungen. Die analysierten Messwerte in y-Richtung geben die Neigungsänderungen der Staumauer zur Wasser- bzw. Luftseite an. Die Sensortemperaturen wurden für die Auswertung und Interpretation der Neigungswerte verwendet, obwohl sie die interne Temperatur im Sensor und nicht die Umgebungstemperatur angeben. Testmessungen und deren Analyse im Institut haben jedoch belegt, dass die Sensortemperatur im Mittel 4 bis 5 °C höher ist als die Umgebungstemperatur. Bei Betrachtung der Differenztemperaturen bezüglich der Nullmessung wird dieser Unterschied zwischen der Sensortemperatur und der Umgebungstemperatur in der Staumauer herausgerechnet. Die Sensortemperatur passt sich Änderungen der Umgebungstemperatur in einem sehr kurzen Zeitraum von ein bis zwei Stunden an. Die Sensortemperatur kann somit als Indikator für die Veränderung der Umgebungstemperatur in der Staumauer an den einzelnen Messpositionen herangezogen werden und belegt damit die Auswirkungen der Lufttemperatur außerhalb der Staumauer auf die Lufttemperatur in dem Kontrollgang bzw. in dem Schacht in Bogenmitte der Staumauer, vgl. Abb. 4.23.

Die Neigungssensoren N8 und N9 an der Fuge SI/WI wurden am Übergang der Bogenmauer zur Flügelmauer positioniert, da das Fugenband dieser Fuge beim Bau der Staumauer beschä-

dig wurde. Mit Hilfe der Neigungsmessungen an der Bogenmauer und der Flügelmauer sowie den an dieser Fuge durchgeführten Fugenmessungen konnte das Verhalten dieser Fuge und das Zusammenspiel der Bogenmauer und der seitlichen Flügelmauer untersucht werden. Da diese Messungen keine Erkenntnisse über das Verformungsverhalten der kombinierten Bogen-Gewichtsstaumauer liefern, sondern zu einem anderen Zweck durchgeführt wurden, werden sie nachfolgend nicht betrachtet.

In den folgenden Diagrammen sind die Relativmesswerte dargestellt, wobei die erste Messung am 21. Juni 1999 um 13:00 Uhr als Nullmessung angesetzt wurde und sich alle nachfolgenden Messungen auf diese Nullmessung beziehen. In den Messkurven der relativen Neigungsänderung zur Wasser- bzw. Luftseite (y-Richtung) entspricht eine positive Neigungsänderung einer Neigung der Mauer zur Wasserseite in Relation zur Nullmessung. Dementsprechend gibt eine negative Neigungsänderung eine relative Mauerverformung zur Luftseite an. Die Vorzeichendefinition für die Auswertung und die Ausrichtung der einzelnen Nivel 20 zeigt Abb. 4.22.

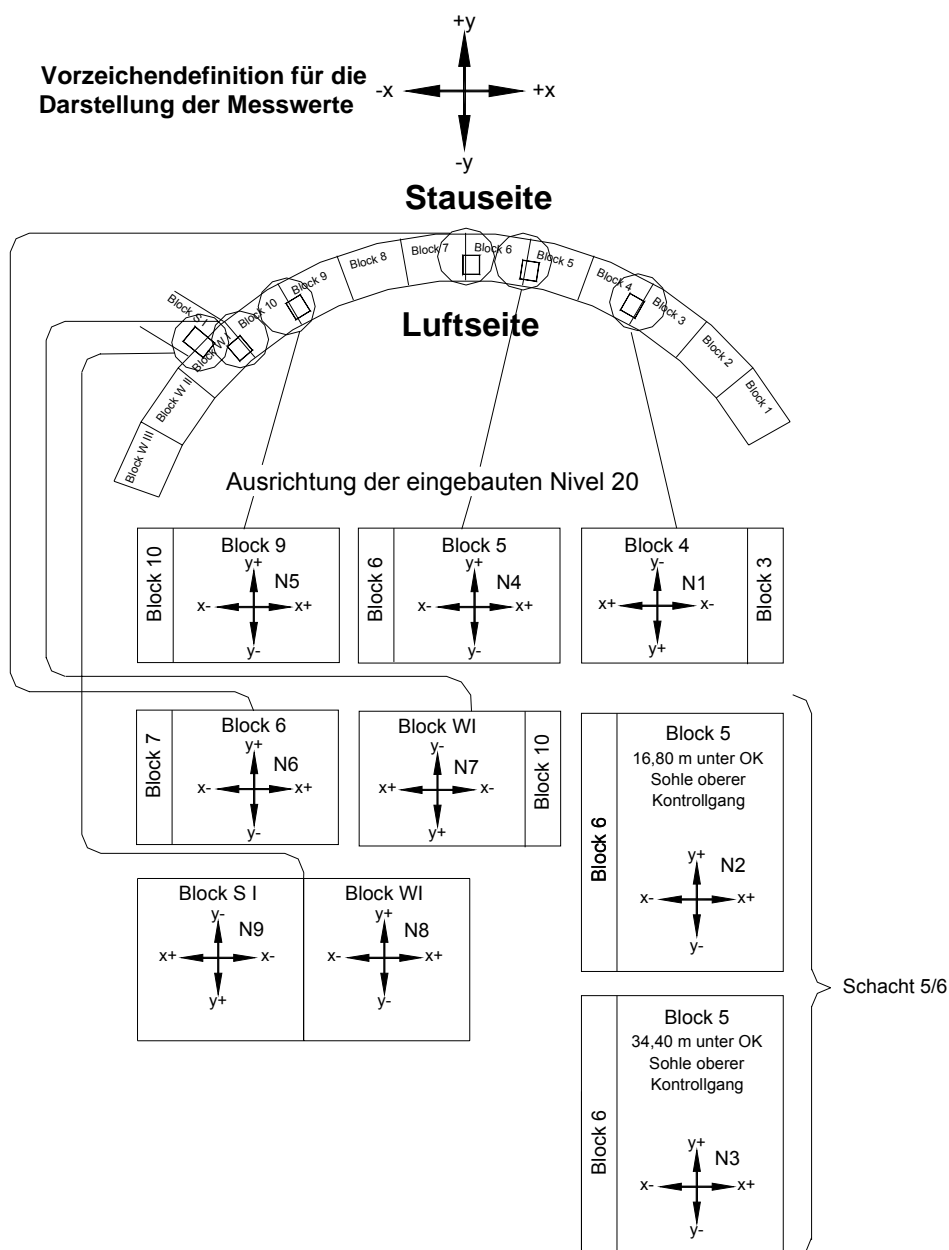


Abb. 4.22: Ausrichtung der Nivel 20 und Vorzeichendefinition für die Auswertung

In der Legende der einzelnen Messkurven steht die Variable ΔY_i für die relativen Neigungsmesswerte des Sensors N_i . Die Zuordnung der einzelnen Sensoren N_i zu den Messstellen ist den Abb. 4.14 und Abb. 4.15 zu entnehmen.

Die Abb. 4.23 zeigt die Messergebnisse an Fuge 5/6 (Mauermitte) in Höhe des oberen Kontrollgangs. In dem Diagramm sind die Neigungsänderungen zur Wasser- bzw. Luftseite, die Sensortemperaturänderung, die absolute Außenlufttemperatur sowie die Stauhöhe über die Zeit aufgetragen. Die Stauhöhe wird in m angegeben, Bezugssystem ist das Koordinatensystem des FE-Modells, das heißt die Kronenhöhe der Staumauer liegt bei 200 m. Wenn keine abweichenden Angaben gemacht werden, gilt diese Definition grundsätzlich für die Stauhöhenangabe.

Der Vergleich der Außenlufttemperatur mit der Sensortemperatur in Abb. 4.23 zeigt den Einfluss der Außenlufttemperatur sehr deutlich. Die relativen Sensortemperaturen sind durch die Wärmekapazität der massiven Mauer gedämpft, das heißt die Temperaturspitzen werden geglättet und die Kurve verläuft zeitversetzt. Es existiert eine Phasenverschiebung der Temperaturganglinien von Luft- und Sensortemperatur. Aus der Sensortemperatur lassen sich qualitative Rückschlüsse auf die Umgebungstemperatur im oberen Kontrollgang ziehen.

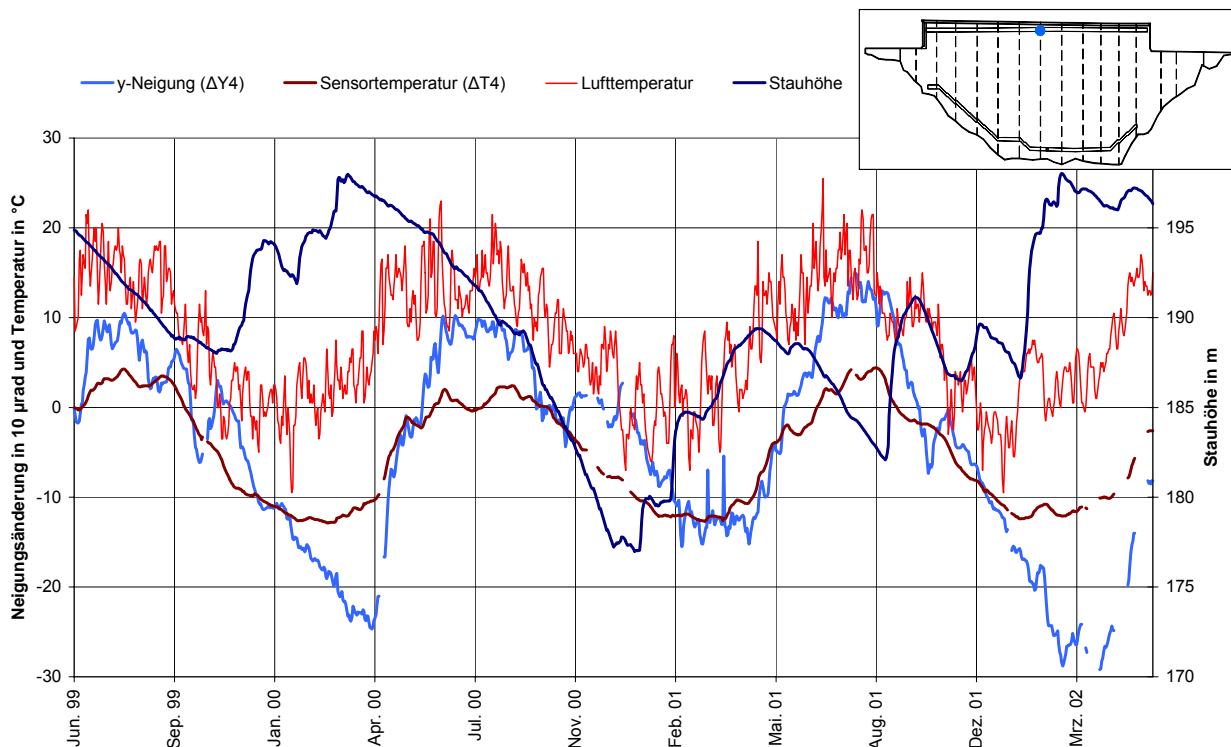


Abb. 4.23: Messergebnisse in Bogenmitte im oberen Kontrollgang, Fuge 5/6

In der Darstellung der Messergebnisse ist der Jahresgang der Staumauerverformungen sehr gut zu erkennen. Bei einer Erwärmung verformt sich die Staumauer zur Wasserseite, die Mauer dehnt sich aus und der Bogen wird etwas größer, während bei einer Abkühlung der entgegengesetzte Prozess zu erkennen ist. Im Frühjahr und Herbst werden die Minima bzw. Maxima der Temperaturen erreicht und auch die Neigungsänderungen weisen zu diesen Zeitpunkten Extrema auf. Die Minimaltemperaturen im Frühjahr korrelieren mit den maximalen negativen Neigungsänderungen, das heißt die Staumauer verformt sich zur Luftseite. Im Herbst treten Maximaltemperaturen in Kombination mit maximalen positiven Neigungsänderungen auf, das entspricht einer Staumauerverformung zur Wasserseite. Neben den Temperatureinwirkungen be-

einflusst die Stauhöhe das Staumauerverhalten im Betriebszustand maßgeblich. Ein hoher Wasserstand im Staubecken bewirkt eine Verformung zur Luftseite, während bei geringerem Wasserstand eine Entlastung des Bogens auftritt und sich die Mauer wieder zur Wasserseite verformt. Die Messergebnisse lassen bei normalem Betrieb der Stauanlage jedoch keine Aussage darüber zu, welche Anteile der Verformungen temperaturinduziert bzw. stauhöhenbedingt sind, da beide Größen variabel sind. Es lassen sich nur die Gesamtverformungen feststellen.

Abb. 4.24 zeigt die Neigungsänderungen aller Neigungsmessstellen im Gewichtsmauerteil in Höhe des oberen Kontrollgangs, die absolute Außenlufttemperatur sowie die Stauhöhe. Die Aussagen, die für Abb. 4.23 erläutert wurden, werden in Abb. 4.24 bestätigt. Die Neigungsänderungen im Längsprofil der Schwergewichtsmauer ähneln sich sehr stark. Die größte Amplitude in den Neigungsänderungen zeigt der Neigungssensor N4 in Mauermitte an der Fuge 5/6 und der Sensor N6 an der benachbarten Fuge 6/7, die ebenfalls nahezu in Mauermitte liegt. Dieses Verformungsverhalten war statisch zu erwarten. Zum Bogenrand klingen die Verformungen ab, das heißt die Amplituden der Neigungsänderungen nehmen ab.

Es war geplant, die kontinuierlichen Messungen an der Okerstaumauer Ende März 2002 zu beenden, daher wurde zu diesem Zeitpunkt auch der Mobilfunkvertrag zur Fernwartung des Messsystems gekündigt, vgl. Kap. 4.1.4. Aus technischen und organisatorischen Gründen konnte der Ausbau des Messsystems erst Mitte Juni 2002 erfolgen, da für die Demontage des Systems im Schacht 5/6 ein Fahrkorb benötigt wurde. Deshalb wurde das Messsystem von März bis Mitte Juni 2002 nahezu wartungsfrei betrieben. Aus diesem Grund sind in diesem Zeitraum vermehrte Messausfälle zu verzeichnen.

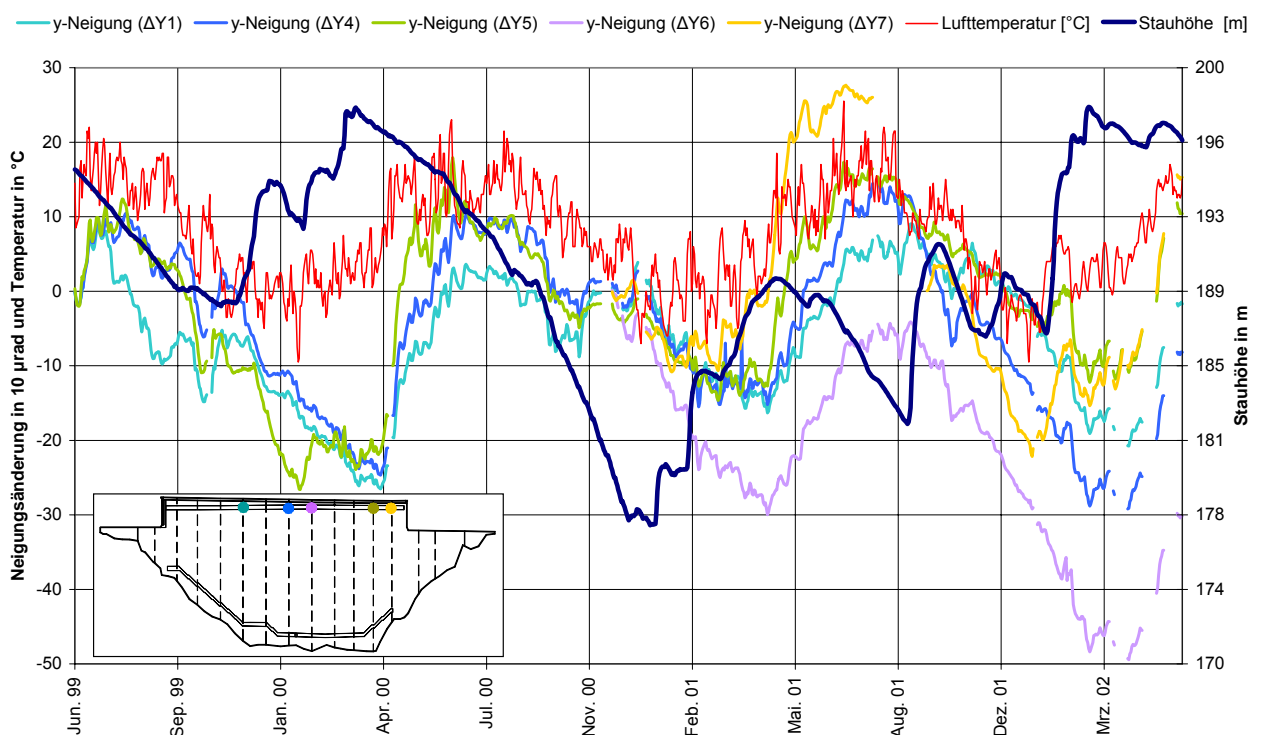


Abb. 4.24: Messergebnisse im Schwergewichtsmauerteil

In Abb. 4.25 sind die Neigungsänderungen der drei Nivel 20, die in Mauermitte im Schacht 5/6 in unterschiedlichen Höhen eingebaut sind, dargestellt. Der Sensor N4 befindet sich in Höhe des oberen Kontrollgangs, der Sensor N2 misst die Neigungsänderungen direkt unterhalb des

Überganges vom Schwergewichtsteil zur Bogenstaumauer und der Neigungsgeber N3 erfasst die Neigungsänderungen ungefähr in halber Höhe der Bogenstaumauer.

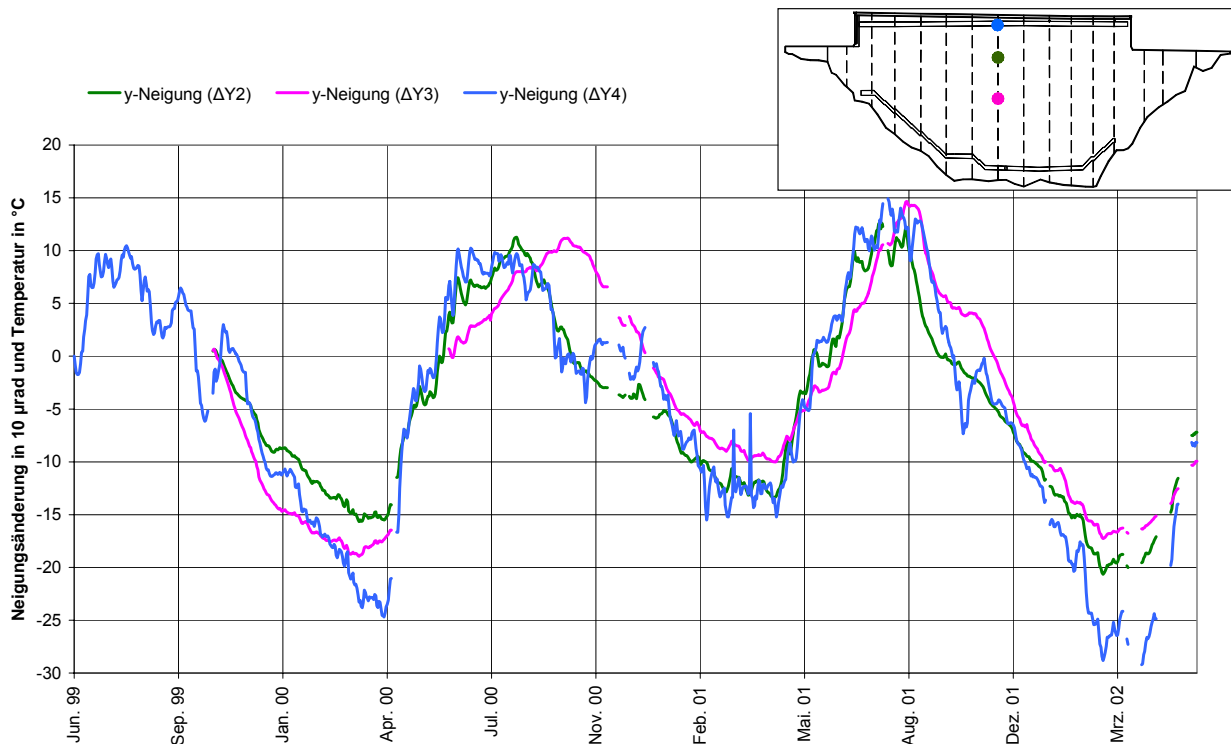


Abb. 4.25: Neigungsänderungen in Bogenmitte im Schacht 5/6

Die Messkurven in Abb. 4.25 zeigen im Bogenmauerbereich einen gleichmäßigeren Verlauf, dabei nimmt diese Tendenz bei dem unteren Nivel 20 zu. Die Messkurven zeigen, dass der Einfluss der Außenlufttemperatur im Bogenmauerbereich geringer ist bzw. die Wassertemperaturen die temperaturbedingten Neigungsänderungen bestimmen. Das ist plausibel, weil die Bogenmauer wasserseitig am oberen Messpunkt überwiegend und am unteren Messpunkt ständig im Bereich der Wasserstaus liegt. Die Amplituden der Neigungsänderungen sind im Schwergewichtsmauerteil geringfügig größer als im Bogenmauerteil.

In den Abb. 4.26 und Abb. 4.27 werden die Neigungsänderungen des Nivel 20 in Bogenmitte im oberen Kontrollgang auf einen möglichen Tagesgang untersucht. Dazu werden die stündlichen Messwerte der Neigung in y-Richtung und der Sensortemperatur herangezogen. Für diese Untersuchung sind als Vergleichsgröße stündliche Temperaturmessungen erforderlich. Entsprechende Temperaturmessungen liegen seit dem Einbau der Temperatursensoren Ende Oktober 2001 vor. Um einen möglichen Tagesgang festzustellen, werden die Neigungsänderungen und die relativen Sensortemperaturen mit den beiden Außentemperatursensoren AT1 und AT2 sowie den Betontemperatursensoren BT6 und BT7 verglichen, die sich in Höhe des oberen Kontrollgangs befinden, vgl. Abb. 4.14.

Es werden zwei Zeiträume vom 15. November bis zum 1. Dezember 2001 und vom 10. bis 23. April 2002 betrachtet. Diese Zeiträume wurden gewählt, weil im November die Temperaturschwankungen innerhalb von 24 Stunden maximal 5°C betragen. Im April treten dagegen tägliche Temperaturschwankungen auf, die bis zu 20°C betragen können. Nachts können Temperaturen um den Gefrierpunkt auftreten, die Tagestemperaturen können hingegen Werte zwischen 15 und 20°C erreichen.

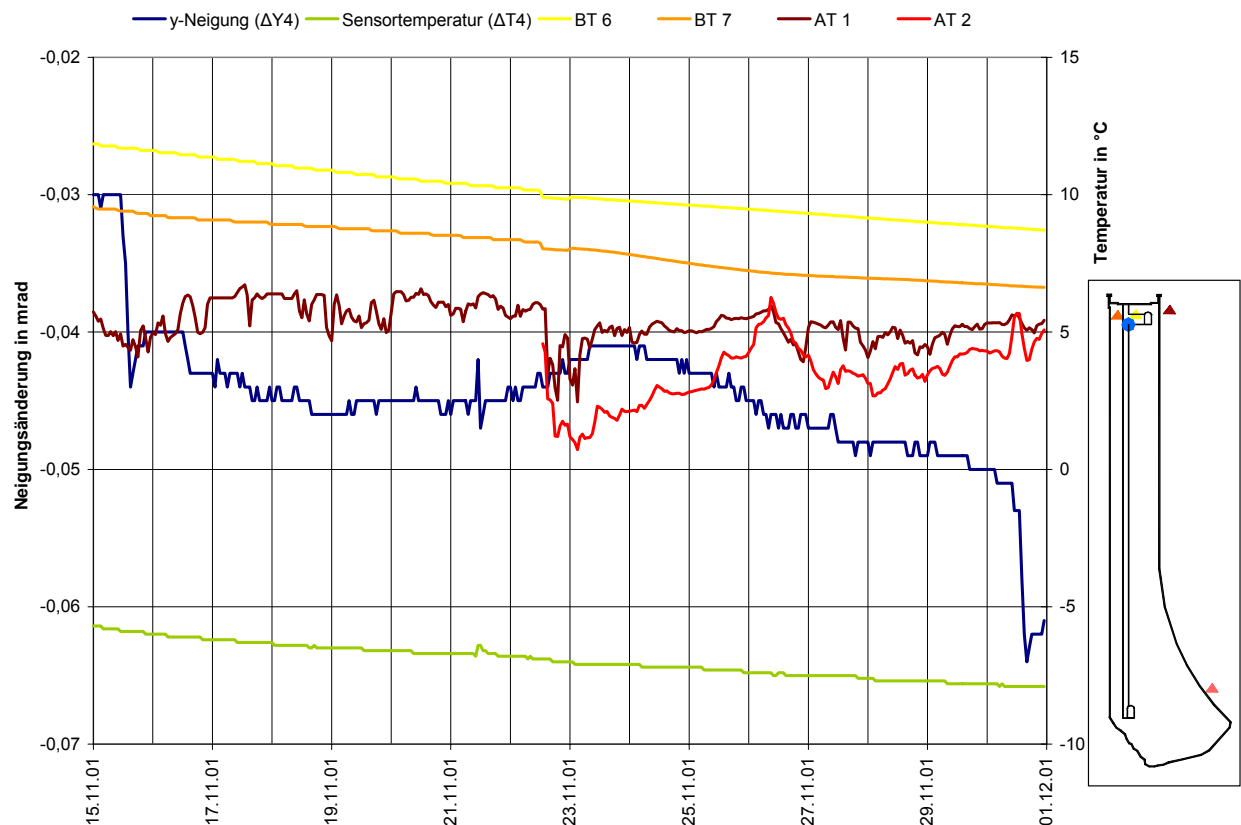


Abb. 4.26: Tagesganguntersuchung im November 2001 in Bogenmitte, Fuge 5/6

Die Diagramme in den Abb. 4.26 und Abb. 4.27 belegen die vorangestellten Überlegungen. Im November ist in den Kurven kein Tagesgang festzustellen, während im April sowohl in den Außentemperaturverläufen als auch in den Neigungsänderungen ein eindeutiger Tagesgang zu erkennen ist. Weder die Sensortemperatur noch die gemessenen Mauertemperaturen spiegeln jedoch diesen Tagesgang wider. Kurzzeitige Temperatureinflüsse wie der Tagesgang der Außentemperatur werden aufgrund der hohen Wärmekapazität der Staumauer gedämpft. Über die genaue Ursache des Tagesgangs in den Verformungsmessungen können an dieser Stelle nur einige Vermutungen angestellt werden, weil für eine Untersuchung die entsprechenden Messungen fehlen. Die Neigungsänderungen können durch intensive Sonneneinstrahlung im Kronenbereich und die dadurch hervorgerufenen großen Temperaturgradienten entstehen. Wasserseitig wird die Staumauer von der Sonne angestrahlt, da diese Mauerseite im Süden liegt. Die Nordseite der Staumauer, also die Luftseite, wird dagegen nicht von der Sonne angestrahlt, der Mauerfuß liegt zudem im Tal. Außerdem ist im April im Vergleich zum November die mittlere Sonnenscheindauer um etwa den Faktor vier größer, vgl. [181]. Für die Analyse der Effekte aus Strahlungsenergie wäre eine detaillierte Betrachtung der meteorologischen Daten an der Okerstaumauer, wie z.B. Sonnenstand und Sonnenscheindauer, erforderlich. Auch die Wassertemperaturen, die nur einmal wöchentlich gemessen werden, kommen als Ursache für die Verformungen in Frage. Die obere Wasserschicht könnte sich durch Sonneneinstrahlung erwärmt haben. Zum Betrachtungszeitpunkt im April liegen leider keine Wassertemperaturmessungen vor. Die Fugen im Gewichtsmauerteil können in Kombination mit den Temperatureinwirkungen ebenfalls die Ursache der Verformungen sein. Es ist davon auszugehen, dass eine Kombination aus den genannten Effekten die Kronenverformungen hervorruft.

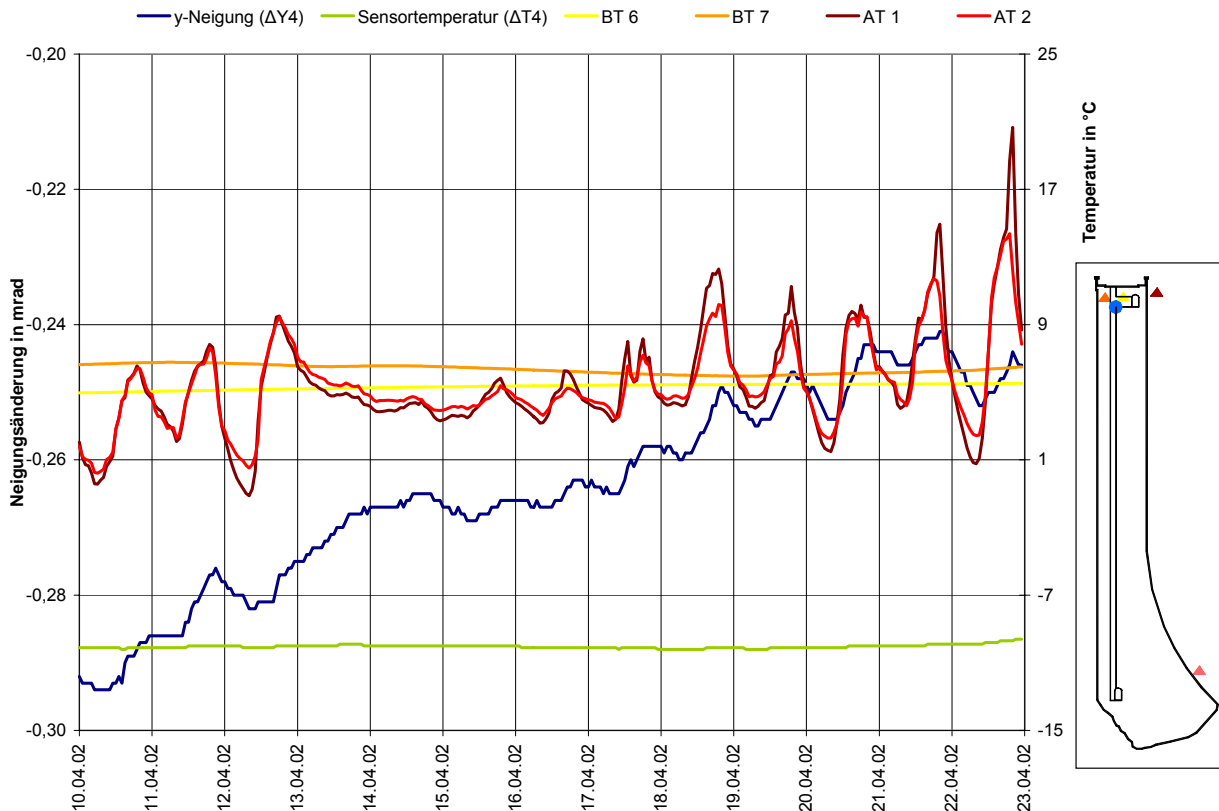


Abb. 4.27: Tagesganguntersuchung im April 2002 in Bogenmitte, Fuge 5/6

Zusammenfassend sind die Messreihen des Nivel 20 in Hinblick auf die Temperatur- und Wasserstandsmessungen plausibel.

4.2.2 Inklinometer- und Lotmessung

Von den durchgeführten Messungen wird nur bei den drei Lotmessungen die Kronenbewegung bzw. genauer die Auslenkung in Höhe des oberen Kontrollgangs direkt gemessen. Bei den Neigungs- und Inklinometermessungen werden Neigungen gemessen, aus denen die Auslenkung berechnet werden kann.

Die Inklinometermessungen in Bogenmitte der Staumauer wurden einmal wöchentlich durchgeführt. Die Qualität der Inklinometermessung hängt stark von der Erfahrung und Sorgfalt des Messenden ab. Um die Messfehler zu minimieren, wurden jeweils zwei Messdurchgänge mit Umschlagsmessung durchgeführt. Bei großen Abweichungen zwischen dem ersten und zweiten Messdurchgang erfolgte noch eine dritte Kontrollmessung. Für die Messauswertung wurden aus den Messungen eines Messtermins die Mittelwerte gebildet, bei großen Abweichungen wurde die am stärksten abweichende Messreihe verworfen. Die Inklinometerrohdaten liegen in der Software der Firma Glözl in einem Format gemäß Abb. 4.28 vor. Die Auswertung der Messdaten kann direkt mit der Software erfolgen, indem Verformungskurven ermittelt werden. Für weitergehende Auswertungen, wie beispielsweise die Mittelwertbildung bei den Messungen an der Okertalsperre, können die Rohdaten aus dem Glözl-Programm direkt in eine MS-Excel-Tabelle übergeben und dort weiterbearbeitet werden. Für die hier vorliegenden Messungen wurden alle Auswertungen in MS-Excel durchgeführt, um einen Vergleich mit den Lot- und Neigungsmessungen zu ermöglichen.

Schritt m	A 1 1/10mm	A 2 1/10mm	B 1 1/10mm	B 2 1/10mm
1,00	-122	-122	172	-186
2,00	-68	-112	168	-176
3,00	-39	-45	57	-93
4,00	30	-34	32	-52
5,00	-28	-32	7	-33
6,00	68	-72	2	-20
7,00	-60	-66	10	-9
8,00	-19	-21	-13	23
9,00	-37	37	-3	4
10,00	-20	-23	-9	8
11,00	-32	-13	-14	9
12,00	-34	-62	-26	35
13,00	-60	-59	-19	19
14,00	38	-38	-14	43
15,00	-5	-18	-45	67
16,00	-10	-8	-47	57
17,00	-37	-33	-29	40
18,00	-46	45	-26	12
19,00	-46	45	-17	18
20,00	-53	26	47	-57
21,00	-50	17	187	-172
22,00	-44	16	162	-159
23,00	-48	32	132	-106
24,00	-32	-9	50	-86
25,00	-38	37	57	-79

Abb. 4.28: Messdaten aus Inklinometermessung

Für den Vergleich der Neigungsmessungen mit den Lot- bzw. Inklinometermessungen mussten aus den gemessenen Neigungen die Mauerauslenkungen in Höhe des oberen Kontrollgangs ermittelt werden. Für diese Berechnung wurde idealisiert von einem starren Bauwerk und der Annahme, dass die Staumauerverformungen „Kippbewegungen“ um die Gründungsfuge sind, ausgegangen. Die Umrechnung der Neigungswerte in Verschiebungswerte erfolgte durch den vereinfachten Ansatz der Bogenformel

$$b_L = h \cdot \Delta y \quad [4.2]$$

mit b_L Bogenlänge,

hier Auslenkung in Höhe des oberen Kontrollgangs

h Höhe von der Gründungsfuge bis zum oberen Kontrollgang

Δy gemessene Neigungsänderung

Beim Vergleich der Messreihen des Lots, des Nivel 20 an der Fuge 5/6 und der Inklinometermessungen, vgl. Abb. 4.29, zeigen die verschiedenen Messverfahren eine gute Übereinstimmung. Die Abweichungen der Kurven zueinander liegen im Bereich der Messgenauigkeit. Bei den wöchentlichen Lotablesungen, die optisch erfolgen, wird eine Genauigkeit von ± 5 mm erreicht. Der Fehler bei den Inklinometermessungen addiert sich mit jedem Messschritt über die Mauerhöhe und wird zusätzlich von anderen Faktoren beeinflusst. In Höhe des oberen Kontrollgangs kann daher von einer Messunsicherheit von ± 5 mm ausgegangen werden.

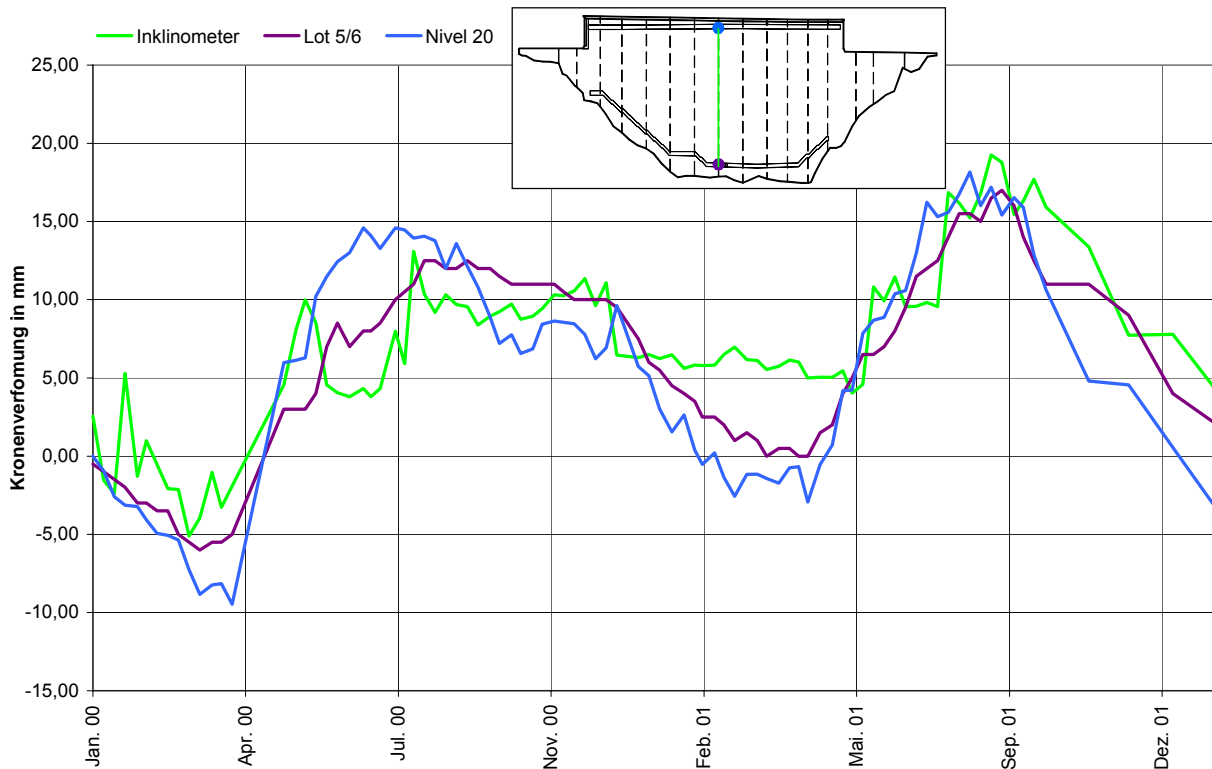


Abb. 4.29: Vergleich von Lot-, Inklinometer- und Neigungsmessung in Mauermitte in Höhe des oberen Kontrollgangs

4.2.3 Fugenmessgeräte

Die Messwertausgabe der Wegaufnehmer erfolgt als Spannung in dem Datalogger.

Abb. 4.30 zeigt den Aufbau eines ASCII-Dateifiles, der mit Hilfe eines Laptops und eines Terminalprogramms aus dem Datalogger ausgelesen wird.

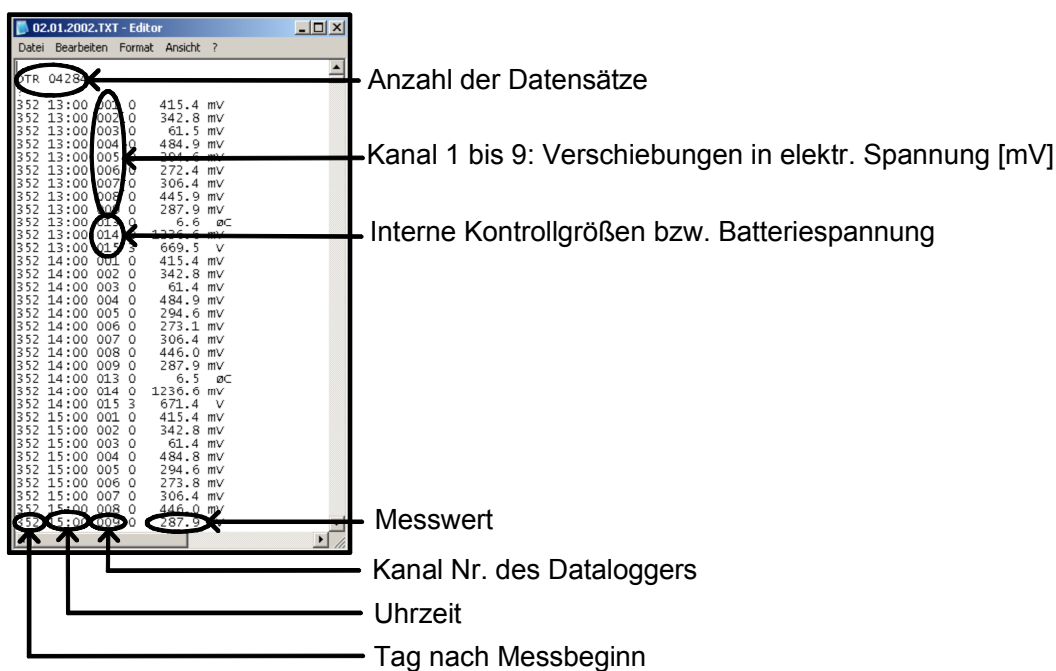



Abb. 4.30: Datenfile der Fugenmessung

Die Umrechnung der gemessenen Spannungen in Verschiebungen erfolgte in MS-Excel auf Grundlage des Kalibrierblatts, das für jeden Wegaufnehmer vorliegt, vgl. Abb. 4.31.

 Glötzel Gesellschaft für Bautechnik mbH Telefon (0721) 51 66 - 0 Telefax (0721) 51 66 30 Follweg 11 76287 Rheinstetten Germany		Kalibrierblatt für <i>Wegaufnehmer</i> 10 / 91						
Gebetyp: <i>GWD 30/100</i> Geber - Nr.: <i>002080</i> Meßbereich: <i>0 - 100 mm</i> Versorgung: <i>1V. Bauteil</i> Ausgangssignal: <i>V</i> Elektr. Aufnehmer: Nullwert (PV): Leitungstyp: (m)		Auftraggeber: <i>Institut für Geotechnik u. Mechanik</i> Auftrags - Nr.: <i>16.813/1</i> Datum: <i>25.04.00</i> Unterschrift: <i>[Signature]</i>						
Belastung (mm)	(V)	Δ	()	Δ	()	Δ	()	Δ
0	0.053							
10	0.053	0.013						
20	0.054	0.013						
30	0.056	0.013						
40	0.057	0.013						
50	0.057	0.013						
60	0.057	0.013						
70	0.056	0.013						
80	0.055	0.013						
90	0.053	0.013						
100	0.055	0.013						

Datenblatt Aufnehmer		Nr. Farbe Vers. + <i>1</i> <i>rot</i> Vers. - <i>2</i> <i>schwarz</i> MW + <i>3</i> <i>gelb</i> MW - Schirm	
		Bemerkungen: / bar °C mbar	

Abb. 4.31: Kalibrierblatt eines Wegaufnehmers

Die räumliche Verschiebung von jeweils zwei Blöcken der Staumauer gegeneinander wurde stündlich erfasst. Dabei beschreibt die Fugenbewegung in x-Richtung das Öffnen bzw. Schließen der Fugen in Mauerlängsrichtung, vgl. Abb. 4.13, welche für die Messungen an der Okeralsperre von vorrangigem Interesse war. Die y-Richtung gibt die Verschiebung der Fugen gegeneinander zur Wasser- bzw. Luftseite an und die z-Richtung kennzeichnet die Blockverschiebungen in vertikaler Richtung. Aus den stündlichen Messwerten wurden für die zeitliche Betrachtung der Messwerte Tagesmittel gebildet. Durch die Mittelwertbildung über 24 Stunden erfolgt eine Glättung der Messwerte.

Die Fugenmessungen an der Fuge 10/WI und der Fuge WI/SI wurden durchgeführt, um das Verhalten der Blöcke an der beschädigten Fuge, s. o., zu untersuchen. Da die Untersuchung der beschädigten Fuge nicht im Zusammenhang mit der Fragestellung dieser Arbeit steht, werden diese Ergebnisse hier nicht näher betrachtet. Ein Fugenmessgerät fiel aus ungeklärter Ursache sehr häufig aus, so dass größere Datenlücken bestehen. Daher können die Messungen an der Fuge 5/6 nicht verwendet werden. Es stehen folglich nur die Messungen an der Fuge 6/7 zur Verfügung, die in der Abb. 4.32 im Vergleich mit den gemessenen Neigungsänderungen an dieser Fuge dargestellt sind. Für die Auswertung wurde die Messung am 28.11.2000 als Nullmessung angesetzt und die nachfolgenden Messungen wurden auf die Nullmessung bezogen. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Öffnungs- bzw. Schließprozess der Fugen im Vergleich zu den anderen beiden Messrichtungen am größten ist. Die Amplitude der Verschiebungen beträgt in x-Richtung bis zum Zehnfachen gegenüber denen der y- und z-Richtung. Eine positive Fugenbewegung entspricht dabei einer Öffnung der Fuge und eine negative Fugenbewegung steht entsprechend für das Schließen der Fuge bezogen auf die Stellung der Blöcke bei der

Nullmessung. Zwischen den Fugenbewegungen in x-Richtung und den Neigungsänderungen zur Luft- bzw. Wasserseite wurde eine enge Korrelation festgestellt, die auch in Abb. 4.32 zu erkennen ist. Bei einer Neigungsänderung zur Luftseite (negative Δy_6 -Werte) schließt sich die Fuge (negative Δx -Werte) und umgekehrt. Dieses Verhalten ist auch mechanisch zu erwarten.

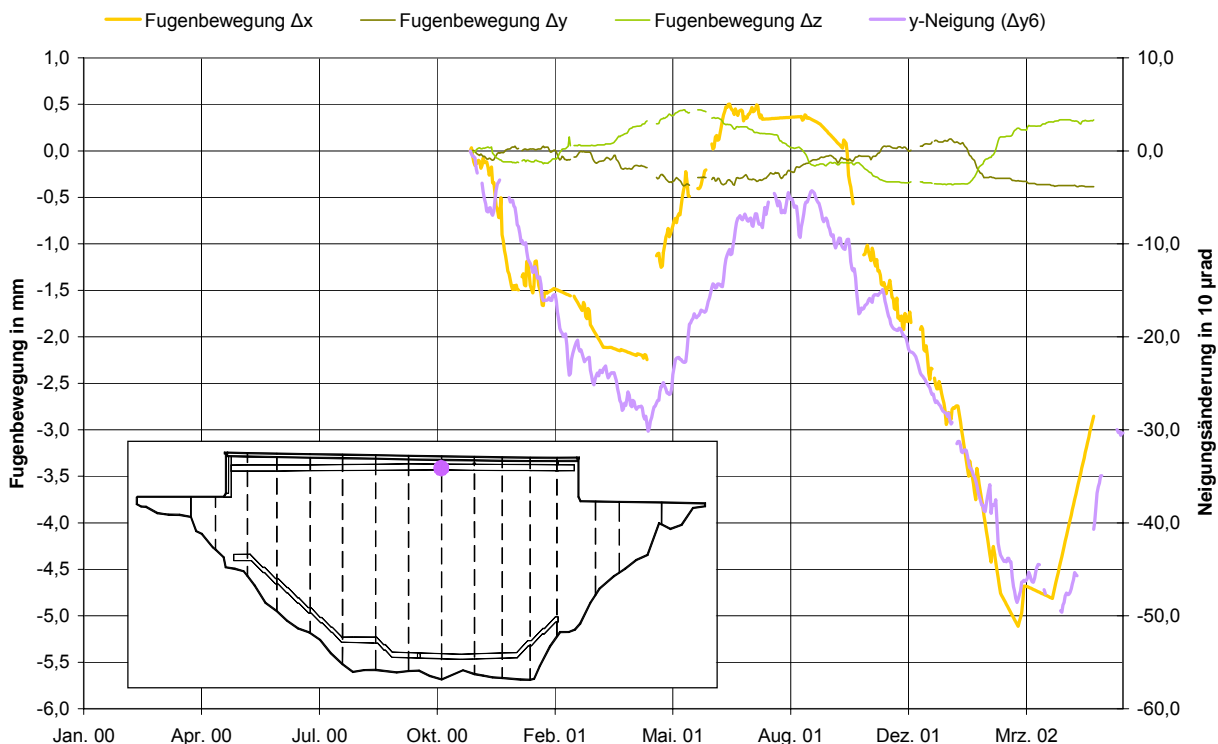


Abb. 4.32: Messung der Fugenbewegungen im Vergleich mit den gemessenen Neigungsänderungen an der Fuge 6/7

4.3 Abweichungen vom Idealmesskonzept

Jedes Messkonzept hat Schwachstellen, die im Vorfeld bekannt sein können, sich im Laufe der Messungen ergeben - beispielsweise durch den Ausfall von einzelnen Messgebern – oder die sich erst bei der Auswertung und Analyse der Messergebnisse zeigen. Bei den Messungen an der Okertalsperre musste das Messkonzept von vornherein auf das bestehende Bauwerk ausgelegt werden. Die Messgeber konnten nicht so angeordnet werden, wie es für die Untersuchungen bzw. vom erwarteten Bauwerksverhalten optimal gewesen wäre, sondern eine Installation der Messgeräte konnte nur in den Kontrollgängen und in den Schächten oder ungeschützt von außen am Bauwerk erfolgen. Eine ungeschützte Messgeberinstallation von außen am Bauwerk entfiel, da eine Beeinflussung der Messwerte durch Fremdeinwirkung ausgeschlossen sein musste. Schwerpunktmäßig wurden die Messgeräte im oberen Kontrollgang eingebaut und im Schacht in Bogenmitte. Der Einbau von Messgebern im Schacht war sehr aufwendig, da für die Schachtbefahrung ein spezieller Fahrkorb angefordert werden musste, vgl. Abb. 4.33. Zusätzlich waren die Arbeitsbedingungen in dem schwingenden Fahrkorb erschwert.



Abb. 4.33: Vorbereitung der Schachtbefahrung für den Messgeräteeinbau

Bei den Temperaturmessungen wird deutlich, dass die Anordnung der Temperatursensoren idealerweise anders gewesen wäre. Um die Betontemperaturen genau erfassen zu können, wäre eine großzügige Bestückung der Mauer mit Temperatursensoren wünschenswert gewesen. Zudem hat sich während der laufenden Messungen gezeigt, dass die Temperatursensoren, die beim Bau der Mauer implementiert wurden, keine plausiblen Messergebnisse liefern. Dadurch liegen erst seit dem Einbau der neuen Temperatursensoren Ende Oktober 2001 Temperaturmessungen im Staumauerkörper vor. In dem vorhergehenden Zeitraum kann leider nur auf die mittleren Tagestemperaturwerte der Umgebung zurückgegriffen werden.

Die von der Harzwasserwerke GmbH eingebauten Wassertemperaturgeber liefern nur einmal wöchentlich Temperaturwerte, ein Messzyklus von einem Tag wäre für die Untersuchungen wünschenswert gewesen. Zudem ist der Temperatursensor WT2, vgl. Abb. 4.14, Ende 1999 ausgefallen. Der obere Temperatursensor WT1 befindet sich nur 8 m unterhalb der Mauerkrone und liegt folglich häufig nicht im Bereich des Wasserstaus, so dass bei einer Stauhöhe unterhalb von dem Sensor WT1 die Lufttemperatur gemessen wird. In diesen Fällen wird der Sensor direkt von der Sonne beeinflusst. Der Sensor WT3 befindet sich etwa 31,50 m unterhalb der Mauerkrone. In dieser Tiefe sind die Wassertemperaturschwankungen gegenüber den oberen Wasserschichten deutlich geringer. Abb. 4.34 zeigt den Verlauf der Luft- und Wassertemperaturmessungen. Zum Verständnis ist zudem die Stauhöhe auf der Sekundärachse aufgetragen.

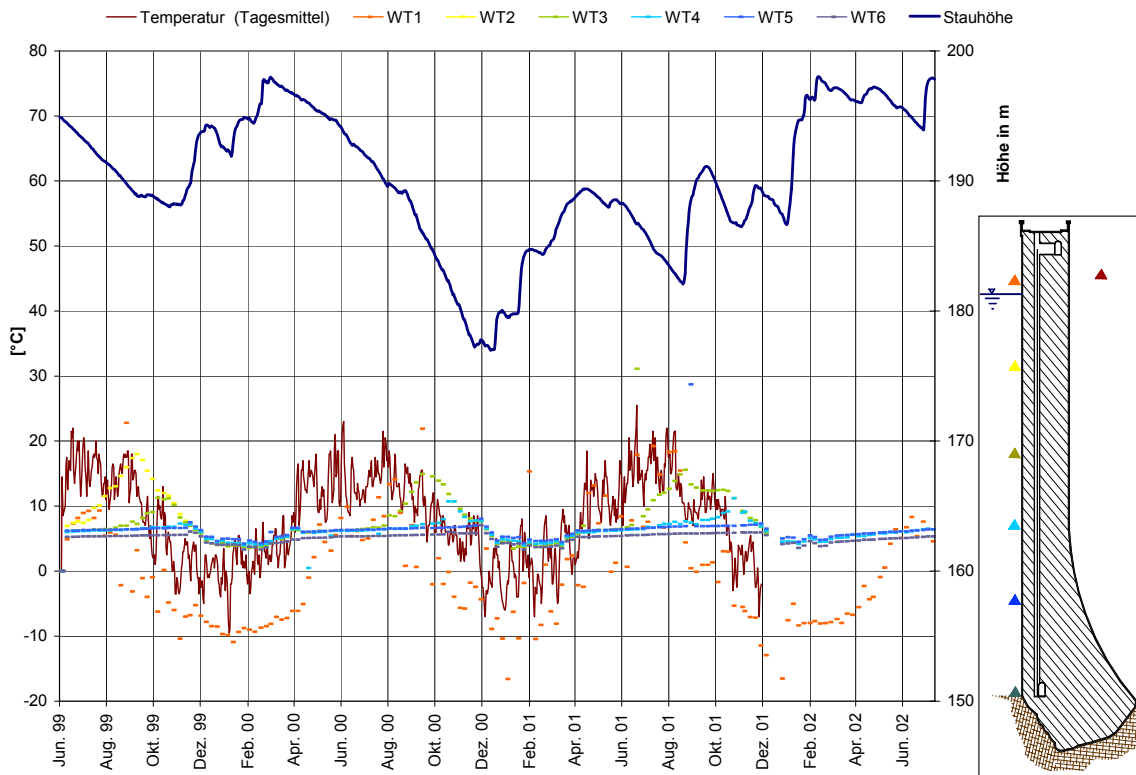


Abb. 4.34: Temperaturmessungen an der Okertalsperre

Im Rahmen eines anderen Forschungsvorhabens, bei dem die Nivel 20 von Leica eingesetzt wurden, haben die Messergebnisse zu einer Untersuchung der Temperaturabhängigkeit der Neigungsgeber im Messlabor des Instituts geführt. Bei dem Versuchsaufbau wurde sichergestellt, dass nur die aufgebrachten Temperaturänderungen die Ursache für die gemessenen Neigungsänderungen sein konnten. Die gemessenen Neigungsänderungen in x- und y-Richtung, die in enger Korrelation mit der Temperatur stehen, lassen sich aufgrund der Messergebnisse und einer FEM-Untersuchung der verwendeten Wandkonsole für die Nivel 20 gemäß Tab. 4.1 aufschlüsseln. Ein numerisches Korrekturverfahren während der Messauswertung erschien nicht sinnvoll, da eine Phasenverschiebung zwischen Temperatur- und Neigungsänderung vorliegt. Für die Beurteilung der Messergebnisse ist von einer gemäß Tab. 4.1 geänderten Messgenauigkeit der Nivel 20 in Kombination mit den verwendeten Konsolen auszugehen.

Einflussparameter	x-Richtung	y-Richtung	Quelle bzw. Nachweis
Nivel 20	$\sim \pm 0,002 \text{ mrad/}^\circ\text{C}$	$\sim \pm 0,002 \text{ mrad/}^\circ\text{C}$	• Leica Handbuch
Wandkonsole	$\sim - 0,005 \text{ mrad/}^\circ\text{C}$	-	• ANSYS • Testmessungen im Messlabor
Korrigierte Messgenauigkeit	$\sim - 0,003 \text{ mrad/}^\circ\text{C}$ bis $\sim - 0,007 \text{ mrad/}^\circ\text{C}$	$\sim \pm 0,002 \text{ mrad/}^\circ\text{C}$	

Tab. 4.1: Genauigkeit der Nivel 20 und der zugehörigen Montagekonsolen

Bei den Inklinometermessungen sind zwei Aspekte bei der Auswertung und Interpretation zu beachten. Die Qualität der Messergebnisse hängt, wie bereits erwähnt, stark von der Erfahrung und Sorgfalt des Messenden ab. Dies gilt bei den Messungen an der Okertalsperre insbesondere, da die Inklinometermessstrecke nicht unter optimalen Bedingungen eingebaut werden konnte. Die Inklinometerrohre konnten nur in den vorhandenen Schächten montiert werden. Dadurch existiert nur alle drei Meter eine starre Verbindung des Rohres mit der Staumauer. In den Zwischenbereichen kann das Rohr Eigenverformungen erfahren, die nicht mit der Staumauerverformung korrelieren müssen. Durch diese Messstreckenmontage musste bei den Messungen darauf geachtet werden, dass das Rohr durch das Ziehen der Sonde nicht in Eigenschwingungen versetzt wurde bzw. diese bei jedem Messschritt vor dem Messwertabgriff abgeklungen waren. Bei einem monolithischen Verbund des Rohres mit der Mauer - beispielsweise durch Einbau des Rohres beim Betoniervorgang - wären diese Effekte unterbunden gewesen.

Neben Schwierigkeiten bei den Temperaturmessungen, die durch die FEM-Simulation ausgeglichen werden, stellten sich die Fugenmessungen als problematisch heraus. Wie bereits erwähnt, sind an der Fuge 5/6, dem Schwerpunkt der übrigen Messungen, durch die häufigen Ausfälle des Fugenmessgeräts keine verwertbaren Messergebnisse vorhanden. Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieser Arbeit keine Analyse der Fugenbewegung im Gewichtsmauerteil mit Hilfe des FE-Modells durchgeführt.

Alle Messungen bzw. die statistische Auswertung der Messungen liefern ein detailliertes Bild über die aufgetretenen Verformungen der Sperrmauer im Betriebszustand. Um das genaue Verformungsverhalten, insbesondere das mechanische und thermische Verhalten der Konstruktion von Bogenstaumauer mit aufgesetzter Schwergewichtsmauer, analysieren zu können, reichen die Messungen nicht aus. Zu diesem Zweck wurde ein FE-Modell erstellt, das das Verständnis für das Verformungsverhalten der Staumauer infolge einzelner Effekte ermöglicht. Außerdem wurde die Entwicklung der Temperaturverteilung im Beton der Staumauer aufgrund von diskret gemessenen Einzeltemperaturen bestimmt. Die Messwerte sind für eine realitätsnahe Simulation des Sperrmauerverformungsverhaltens unerlässlich. Sie ermöglichen die Modellkalibrierung. Die für die FE-Berechnung erforderlichen Annahmen können mit Hilfe der Messergebnisse validiert werden.

5 FE-Modell zur Verformungsanalyse

5.1 Grundlagen der FEM und Modellgenierung

5.1.1 Das Grundprinzip der FEM und Anwendungsprogramme

Die **Finite Elemente Methode** (FEM) ist ein mathematisches Lösungsverfahren zur computerunterstützten numerischen Lösung von gewöhnlichen und partiellen linearen bzw. nichtlinearen **Differentialgleichungen** (DGL). Mit den verschiedenen DGL können große Teile der Probleme aus den Natur- und Ingenieurwissenschaften beschrieben und rechnerisch simuliert werden. Die DGL beschreiben dabei an einem differentiell kleinen Teil der Gesamtstruktur ihr Verhalten. Dabei kann es sich um Fragestellungen z. B. aus der Strukturmechanik, der Thermodynamik oder der Strömungsmechanik handeln. Die Funktion, für die die DGL aufgestellt wird, ist eine charakteristische Größe, wie beispielsweise die Verschiebung bei mechanischen Problemen oder die Temperatur bei Temperaturfeldberechnungen. In Kap. 5.1.1.1 ist die DGL für Festigkeitsberechnungen von dreidimensionalen Körpern und in Kap. 5.1.1.2 die DGL für instationäre, zeitabhängige thermische Berechnungen angegeben. Die exakte Lösung der DGL ist bei mehrdimensionalen Problemen und bei beliebiger Berandung in der Regel nicht möglich, da die exakte Lösung die DGL in jedem Punkt des Gebietes und zudem die Rand- und Übergangsbedingungen erfüllen muss. Bei der FEM handelt es sich also um ein Näherungsverfahren, dessen Aufwand mit der gewünschten Genauigkeit ansteigt. Der Näherungsansatz für die gesuchte Funktion gilt für die gesamte Struktur und setzt sich aus Ansatzfunktionen für die Teilgebiete, die bei der FEM als Elemente bezeichnet werden, zusammen. Die Gesamtstruktur verhält sich wie die Summe der einzelnen Teile, wenn die Anzahl der Elemente hinreichend groß ist und die Rand- und Übergangsbedingungen eingehalten sind. Die Zerlegung der Gesamtstruktur in Elemente wird als Diskretisierung bezeichnet. Für die Elemente werden Ansatzfunktionen gewählt, die so geartet sind, dass sie an den Übergängen der Elemente kontinuierlich an die Nachbar-elemente anschließen. Die Stellen, an denen die Elemente mit den Nachbarelementen verbunden sind, werden als Knoten bezeichnet und bilden ein gemeinsames Merkmal der Elemente. Bei den Ansatzfunktionen handelt es sich in der Regel um einen Produktansatz, der aus vorgegebenen Formfunktionen und Koeffizienten besteht. Die Formfunktion, die für alle Elemente identisch ist, muss die DGL im Inneren des Gebiets oder die Randbedingungen erfüllen. Die finiten Elemente sind also strukturgleich, das heißt sie sind von der gleichen Strukturart und dem gleichem Materialverhalten wie die untersuchte Gesamtstruktur. Die Koeffizienten werden als Freiheitsgrade bezeichnet und sind z.B. bei mechanischen Fragestellungen Knotenverschiebungen oder bei Temperaturfeldberechnungen Knotentemperaturen. Die FEM geht von der Integralform der verwendeten DGL aus und bei der Forderung nach einem Extremum, der beispielsweise mit dem „Prinzip vom Minimum der potentiellen Energie“ entsprochen wird, wird ein Gleichungssystem für die unbekannten Koeffizienten erzeugt. Kap. 5.1.1.1 und Kap. 5.1.1.2 enthalten die entsprechenden Gleichungssysteme für die Festigkeitsberechnung bzw. die instationäre, zeitabhängige Temperaturfeldberechnung. Durch die Auflösung des Gleichungssystems werden die Koeffizienten bestimmt und damit wird auch die gesuchte Näherungslösung festgelegt.

Der Lösungsweg ist grundsätzlich für ein-, zwei- und dreidimensionale Tragwerke identisch. Dadurch ist eine einheitliche Behandlung beliebig zusammengesetzter Strukturen möglich und damit sind komplexe Geometrien berechenbar.

Die Anwendung der FEM ist aufgrund der umfangreichen Rechenprozesse immer an ein FEM-Programm gebunden, vgl. auch [119]. Es existieren schätzungsweise weit mehr als 1000 FEM-Programme, wobei es sich häufig um Spezialprogramme für eingegrenzte Problemstellungen handelt. Von den so genannten General-Purpose-Programmen, die ein breites Anwendungsspektrum abdecken, gibt es nur etwa ein Dutzend, dazu zählen ABAQUS, ANSYS, MARC und NASTRAN. Für die FEM-Untersuchung der Okerstaumauer wurde ANSYS von der Firma Ansys Inc. eingesetzt. ANSYS bietet eine Vielzahl von Elementen zur Berechnung der unterschiedlichen Feldproblematiken.

5.1.1.1 Festigkeitsberechnungen

Die Grundlage der strukturmechanischen Berechnungen ist die Differentialgleichung in allgemeingültiger Form, die im ganzen Körper erfüllt sein muss, vgl. auch [11] und [119]:

$$\tau_{ij,j} + f_i = 0 \quad [5.1]$$

mit

$\tau_{ij,j}$ Spannungen in den drei Raumrichtungen

f_i Volumenkräfte

Am Beispiel des allgemein bekannten Biegebalkens reduziert sich die DGL wie folgt:

$$\frac{d^4 u_y}{dx^4} = \frac{p(x)}{E \cdot I} \quad [5.2]$$

mit

$p(x)$ Streckenlast

E Elastizitätsmodul

I Flächenträgheitsmoment

x, y Koordinaten bzw. Länge

Die in den DGL auftretenden Größen sind nach der Umwandlung in ein Gleichungssystem gemäß der FEM wieder zu erkennen. In Matrizenschreibweise, in die [11], [23] und [117] einführen, lautet das Gleichungssystem zur Berechnung der unbekannten Knotenverschiebungsgrößen:

$$[K] \cdot \{u\} = \{Q\} \quad [5.3]$$

mit

$[K]$ Steifigkeitsmatrix

$\{u\}$ Knotenverschiebungsvektor

$\{Q\}$ Lastvektor

In $[K]$ sind die Koeffizienten des Gleichungssystems zusammengefasst, die sich bei Festigkeitsberechnungen im Wesentlichen aus Material- und Geometriedaten errechnen. Daher wird $[K]$ auch als Steifigkeitsmatrix bezeichnet. Die „Steifigkeit“ ist definiert als Proportionalitätsfaktor zwischen Verschiebung u und Kraft Q .

5.1.1.2 Temperaturfeldberechnungen

Die Grundlage der instationären, zeitabhängigen Temperaturfeldprobleme ist eine parabolische Differentialgleichung für Diffusionsvorgänge vgl. auch [11], [59] und [119]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \cdot \lambda_1 \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \lambda_2 \cdot \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \cdot \lambda_3 \cdot \frac{\partial T}{\partial z} = c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + f_{(x,y,z)} \quad [5.4]$$

mit

λ_i Material-Wärmeleitfähigkeit in der jeweiligen Raumrichtung

c Material-Wärmekapazität ($c = c_p \cdot \rho$)

mit

c_p spezifische Wärmekapazität des Materials

ρ Dichte des Materials

T Temperatur

x, y, z Koordinaten bzw. Länge

t Zeit

$f_{(x, y, z)}$ Funktion für innere Wärmequellen

In Matrizenschreibweise lautet das Gleichungssystem dann für instationäre, zeitabhängige Aufgaben:

$$[c] \cdot \{\dot{T}\} + [k] \cdot \{T\} = -\{Q(t)\} \quad [5.5]$$

mit

$\{T\}$ Vektor der Temperaturen

$\{\dot{T}\}$ Vektor der Temperaturänderungen (1. zeitliche Ableitung)

$[c]$ Matrix der Wärmekapazität

$[k]$ Matrix der Wärmeleitfähigkeit

$\{Q(t)\}$ zeitlich veränderlicher Vektor der von außen zu- oder abgeführten Wärmeströme (Lastvektor)

In Gleichung [5.5] ist erkennbar, dass der Term mit der Wärmeleitfähigkeitsmatrix und dem Vektor der Temperaturänderungen nur bei instationären, zeitabhängigen, so genannten transienten

Temperaturfeldproblemen auftritt. Bei transienten Temperaturfeldanalysen werden also die Effekte der Wärmespeicherung berücksichtigt. Bei stationären Temperaturfeldberechnungen entfällt dieser Term und der Wärmestromvektor ist unabhängig von der Zeit.

Für den stationären Fall entspricht das Gleichungssystem dem aus der mechanischen Analyse. Die Freiheitsgrade stellen in der Strukturmechanik die Knotenverschiebungen und in der Temperaturfeldberechnung Knotentemperaturen dar. Der Lastvektor unterscheidet sich nur in der Erscheinungsform der Belastung. Anstelle der Steifigkeitsmatrix in der strukturmechanischen Gleichung wird bei der thermischen Analyse die Wärmeleitfähigkeitsmatrix verwendet. Die Wärmeleitfähigkeitsmatrix in der Temperaturfeldberechnung errechnet sich im Wesentlichen aus den Materialkennwerten der Wärmeleitfähigkeit und den Geometriedaten. Damit ähnelt die Wärmeleitfähigkeitsmatrix prinzipiell der Steifigkeitsmatrix.

5.1.2 Ablauf einer FEM-Analyse für strukturmechanische und thermische Fragestellungen

Die generelle Vorgehensweise einer Finite-Elemente-Berechnung strukturiert sich wie folgt:

- Approximation der Struktur:
Es werden nur die Strukturen in das FE-Modell implementiert, die zur korrekten Darstellung des mechanischen und thermischen Verhaltens erforderlich sind.
- Auswahl des Elementtyps:
Neben der Systemgeometrie spielt die Berechnungstheorie, die den einzelnen Elementtypen zugeordnet ist, eine entscheidende Rolle. Daran gekoppelt sind auch die DGL des betrachteten Problems, die Form des Elements sowie die verwendete Formfunktion.
Bei den Elementen zeigt sich der Vorteil der FEM, nämlich die Übertragbarkeit auf andere physikalische Anwendungsgebiete und damit auf andere DGL. Die Formfunktionen für die Elementansätze sind unabhängig von der Anwendung. Ausgetauscht werden nur die Freiheitsgrade, z. B. Knotenverschiebungen für Festigkeitsberechnungen und Knotentemperaturen für Temperaturfeldberechnungen.
- Festlegen der Materialeigenschaften:
Die Materialkennwerte, wie z.B. Dichte, Elastizitätsmodul und Wärmeleitfähigkeit, müssen für die Berechnung vorgegeben und das anzusetzende Materialgesetz, beispielsweise linear-elastisch oder viskoelastisch, festgelegt werden.
- Diskretisierung:
Die Zerlegung der Gesamtstruktur in Elemente kann programmgesteuert erfolgen, führt aber oft zu einer schlechten Elementierung, die sich in den Berechnungsergebnissen widerspiegelt. Daher sollte der Anwender die Vernetzung steuern und optimieren.
Im Anschluss an die Elemententeilung werden die Einwirkungen simuliert, die in den meisten Fällen auf die Elemente aufgebracht werden. Es ist daher sinnvoll, die Einwirkungen, z.B. Wasserdruck oder Temperatur, parametrisch zu definieren und so bei der Vernetzung zu berücksichtigen.

- Definition der Einwirkungen und Randbedingungen:

Auf das vernetzte Modell werden entsprechend der geplanten Analyse, strukturellmechanisch oder thermisch, die Randbedingungen (z.B. Auflager oder Temperaturrandbedingungen) sowie die Einwirkungen (z.B. Wasserdruck, Knotentemperaturen oder Umgebungstemperaturen) aufgebracht.

Bei transienten thermischen Analysen ist als Besonderheit zu beachten, dass hier Lasten einwirken, die eine Funktion der Zeit darstellen. Um zeitabhängige Lasten zu spezifizieren ist der Last-Zeitverlauf in angemessene Lastschritte zu zerlegen, also zeitlich zu diskretisieren. Jede Änderung in der Last-Zeitfunktion muss ein Lastschritt sein, vgl. Abb. 5.1. Die Abarbeitung der Zeitintegration erfolgt als Folge von Zeitschritten (load steps), Zwischenschritten (substeps) und Gleichgewichtsiterationen. Ein Lastschritt umfasst damit die Angabe der Lasten, die auf das Bauteil wirken, und die Angabe, für welches Zeitintervall diese Lasten zutreffen. Zwischenschritte innerhalb eines Lastschritts können verwendet werden, um genauere Ergebnisse zu erzielen oder an Zeitpunkten zwischen den Lastschritt-Endzeitpunkten Ergebnisse zu erhalten. Die Gleichgewichtsiterationen werden automatisch ausgeführt, um an einem Zeitpunkt der Berechnungsfolge das Gleichgewicht im FE-Modell herzustellen. Sie sind jedoch nur bei nichtlinearen Berechnungen, beispielsweise wenn die Materialeigenschaften temperaturabhängig sind, erforderlich. Bei linearen Berechnungen werden sie nicht ausgeführt.

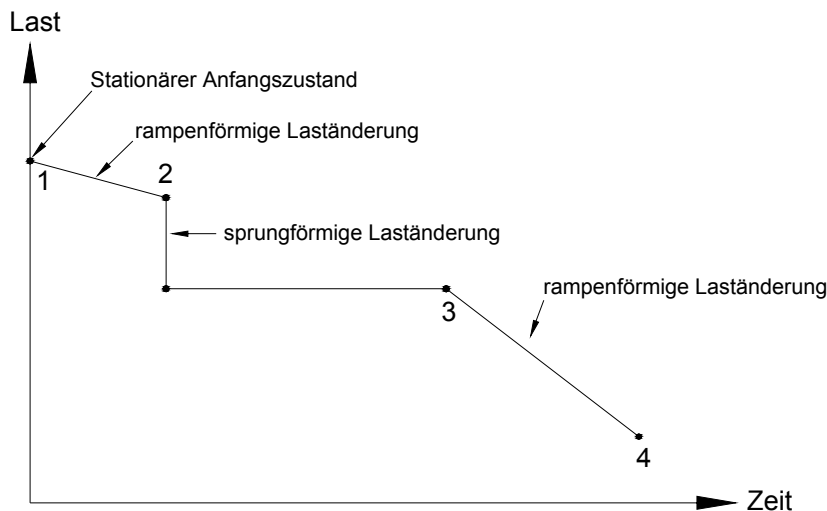


Abb. 5.1: Beispiel einer Last-Zeitfunktion [nach 59]

- Lösungsprozess:

Der Lösungsprozess wird vom Programm durchgeführt und umfasst: die Bildung der Elementsteifigkeitsmatrix und die Kopplung dieser zur Gesamtsteifigkeitsmatrix sowie die Lösung des linearen Gleichungssystems.

- Ergebnisdarstellung:

Der Verlauf der berechneten Verschiebungen für die strukturellmechanische Analyse und der berechneten Knotentemperaturen für die thermische Analyse wird durch diskrete Einzelwerte beschrieben, da es sich bei der FEM um ein Diskretisierungsverfahren handelt. Als eigentliches Berechnungsergebnis liefert die FEM nur die Verschiebungsgrößen bzw. Temperaturen für jeden Elementknoten. Die Verschiebungen bzw. Temperaturen an anderen Stellen werden aus denen der Elementknoten berechnet. Alle

anderen Größen, wie beispielsweise Auflagerkräfte oder Spannungen bei der mechanischen Analyse bzw. Temperaturgradienten oder Wärmestromdichten bei der thermischen Analyse, sind daraus abgeleitete, aber im Programm direkt verfügbare Größen, die entsprechende Genauigkeitseinbußen erfahren.

- Ergebnisinterpretation:
Die Ergebnisse der FEM-Berechnung sind vom Ingenieur zu prüfen und zu beurteilen. Erst durch die Ingenieurbewertung werden sie aussagekräftig.

Diese Vorgehensweise bei einer FEM-Analyse ist also unabhängig von der Art der Analyse, das heißt es kann sich wie am Beispiel der untersuchten Staumauer um eine Strukturanalyse oder eine Temperaturfeldberechnung handeln. Der wesentliche Unterschied zwischen der Strukturanalyse und der Temperaturfeldberechnung besteht darin, dass ein anderer Elementtyp gewählt werden muss, der als Knotenergebnis statt der Verschiebungen die Temperaturen liefert. Eine transiente Temperaturfeldberechnung wird durchgeführt, wenn die Temperaturen, wie im Fall der Okerstalsperre, nur zu wenigen Zeitpunkten an einigen diskreten Punkten der Staumauer bekannt sind. Nach der Temperaturfeldberechnung werden die Temperaturen auf das mechanische Modell übertragen und es wird die strukturmekanische Analyse der Spannungen und Verschiebungen ausgeführt, vgl. Abb. 5.2. Man bezeichnet dieses Vorgehen als Temperatur-Struktur-Kopplung. Sinnvoll ist es, die Modellerstellung und -vernetzung so durchzuführen, dass das FEM-Netz auch für die strukturmekanische Berechnung verwendet werden kann. Dazu muss ein Elementtyp gewählt werden, der ein entsprechendes Pendant in der thermischen bzw. strukturmekanischen Elementauswahl aufweist.

Mit der FEM wird das zu simulierende Bauwerk physikalisch fundiert abgebildet. Alle Modelle sind jedoch Abstraktionen, daher können die Berechnungsergebnisse immer nur so gut sein wie die entwickelten Modelle und ihre Eingangswerte.

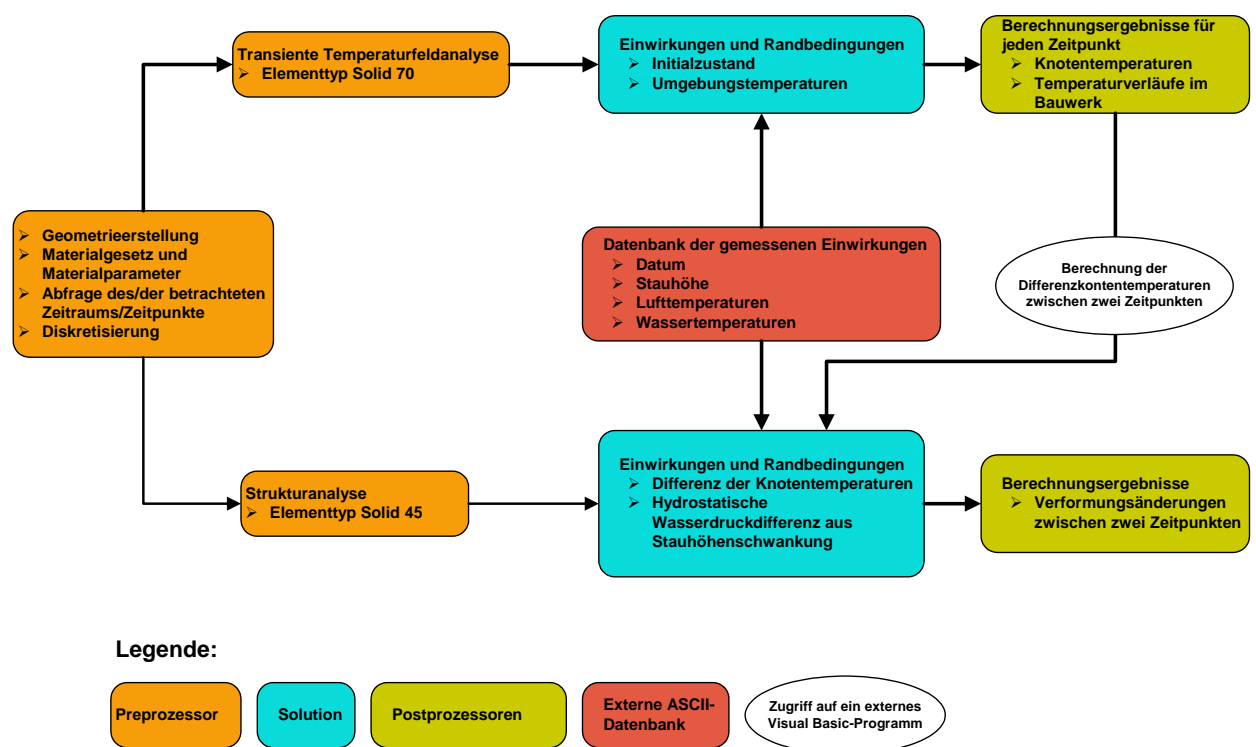


Abb. 5.2: Ablauf der FEM-Analyse mit Temperatur-Struktur-Kopplung für die Okerstaumauer

5.1.3 Das Programmsystem ANSYS

ANSYS ist ein General-Purpose-Programm der Firma ANSYS Inc. aus Canonburg/Pittsburgh, USA und wird seit Ende der sechziger Jahre ständig weiterentwickelt. Im deutschsprachigen Raum wird ANSYS Inc. durch die Firma CAD-FEM in Grafing vertreten. Die Einsatzgebiete von ANSYS erstrecken sich vom Bauwesen über Automobilbau, Luft- und Raumfahrt, Schiffbau, Maschinenbau, Elektronik, Physik, Biologie, Medizintechnik bis hin zur Prozesssimulation um nur einige Anwendungsbereiche zu nennen. Für die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Untersuchungen wurde die Version ANSYS 7.1 verwendet, Handbücher, technischen Support sowie weiterführende Internetlinks bieten [3] und [26].

5.1.3.1 ANSYS-Kommandosprache und Batch-Betrieb

ANSYS bietet einen umfassenden Befehlswortschatz, mit dem komplette Analysen programmiert werden können. Ein Batch-File enthält dabei eine Abfolge von ANSYS-Befehlen und ermöglicht den Ablauf einer FEM-Berechnung im Batch-Modus ohne Eingaben über die graphische Benutzeroberfläche. Die Verwendung von Macros, vgl. Kap. 5.1.3.2, erlaubt eine komfortable Erstellung von Programmabläufen mit Unterprogrammen.

5.1.3.2 ANSYS Parametric Design Language (APDL) und Macros

Mit Hilfe der ANSYS-Parametersprache kann eine FEM-Analyse auf unterschiedliche Art und Weise vereinfacht werden. Wie in einer Programmiersprache können Parameter definiert werden. Parameter sind benannte Variablen, die numerische oder alphanumerische Werte zuordnen können. Mittels APDL sind beispielsweise auch Rechenoperationen, Kommando-Wiederholungen, „Do-Schleifen“ und „If-Then-Else“-Verzweigungen möglich.

Ein Macro ist eine Sequenz von ANSYS-Kommandos, das bestimmte, regelmäßig wiederkehrende Programmabläufe durch die Speicherung der Befehle in einer Datei vereinfacht und dann in dem Berechnungsablauf über eigenes ANSYS-Kommando ausgeführt wird. Die Länge von Macros ist nicht begrenzt und Macros können sich gegenseitig aufrufen, deshalb eignen sie sich hervorragend für die strukturierte Programmierung einer FEM-Analyse.

5.1.3.3 Verwendete Einheiten in ANSYS

ANSYS verwendet bei der Berechnung kein bestimmtes physikalisches Maß- oder Einheitensystem, sondern rechnet dimensionslos, aber konsistent, das heißt die Einheiten, die der Anwender für die Eingabe verwendet, sind auch für die Ausgabe entsprechend gültig. Der Anwender muss fünf Einheiten grundlegend für die Berechnung festlegen, die anderen Einheiten leiten sich daraus ab. Dabei ist unbedingt darauf zu achten, dass das gewählte Einheitensystem streng beibehalten wird.

Als Basiseinheiten wurden für das Staumauermodell SI-Einheiten gemäß Tab. 5.1 verwendet.

Masse	kg
Kraft	N
Länge	m
Zeit	s
Temperatur	K bzw. °C

Tab. 5.1: Verwendete Basiseinheiten

Die wichtigsten daraus abgeleiteten Einheiten zeigt Tab. 5.2.

Kraft	N
Spannung	N/m^2
Dichte	kg/m^3
Arbeit, Energie, Wärmemenge	J
Spez. Wärmekapazität	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
Wärmekapazität	J/K
Wärmestrom	W
Wärmestromdichte	W/m^2
Wärmeleitfähigkeit	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
Wärmeübergangskoeffizient	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
Wärmeausdehnungskoeffizient	-
Querdehnzahl	-

Tab. 5.2: Abgeleitete Einheiten

5.2 FE-Modellierung der Staumauer für Verformungsuntersuchungen im Betriebszustand

5.2.1 Ziel der FEM-Analyse und Vorüberlegungen

Mit Hilfe des FE-Modells soll eine physikalisch fundierte Analyse des komplexen Verformungsverhaltens der Staumauer durchgeführt werden, um das Verständnis für das Bauwerksverhalten im Betriebszustand erhöhen. Vor der Modellerstellung und der damit einhergehenden Idealisierung und Abstrahierung des realen Bauwerks und der auftretenden Einwirkungen müssen die Fragestellung bzw. der Berechnungszweck klar definiert sein, denn sie beeinflussen den Idealisierungsvorgang erheblich. Erst durch ein eindeutig formuliertes Untersuchungsziel können die Modelldetails einschließlich ihrer Einwirkungen hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Ergebnisse beurteilt und berücksichtigt werden. Abb. 5.3 zeigt die möglichen Aspekte, die bei der Modellierung von Talsperren zu berücksichtigen sind. Falls Details für das Untersuchungsziel irrelevant sind, dürfen diese bei der Modellerstellung vernachlässigt werden.

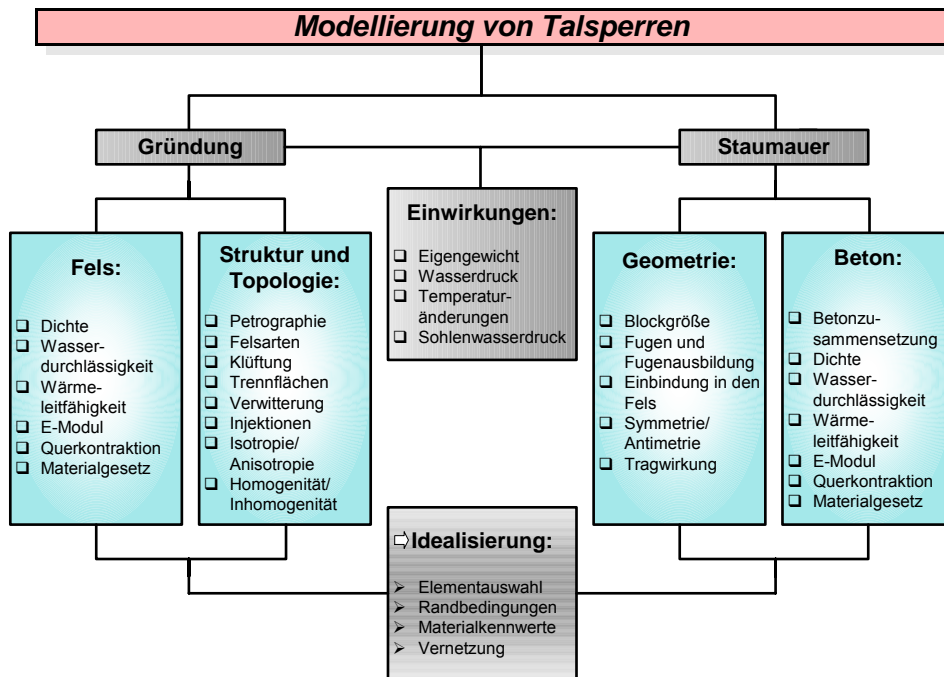


Abb. 5.3: Modellierung von Talsperren

Die prinzipielle Vorgehensweise für die durchgeführten Untersuchungen an der Okerstaumauer zeigt Abb. 5.4.

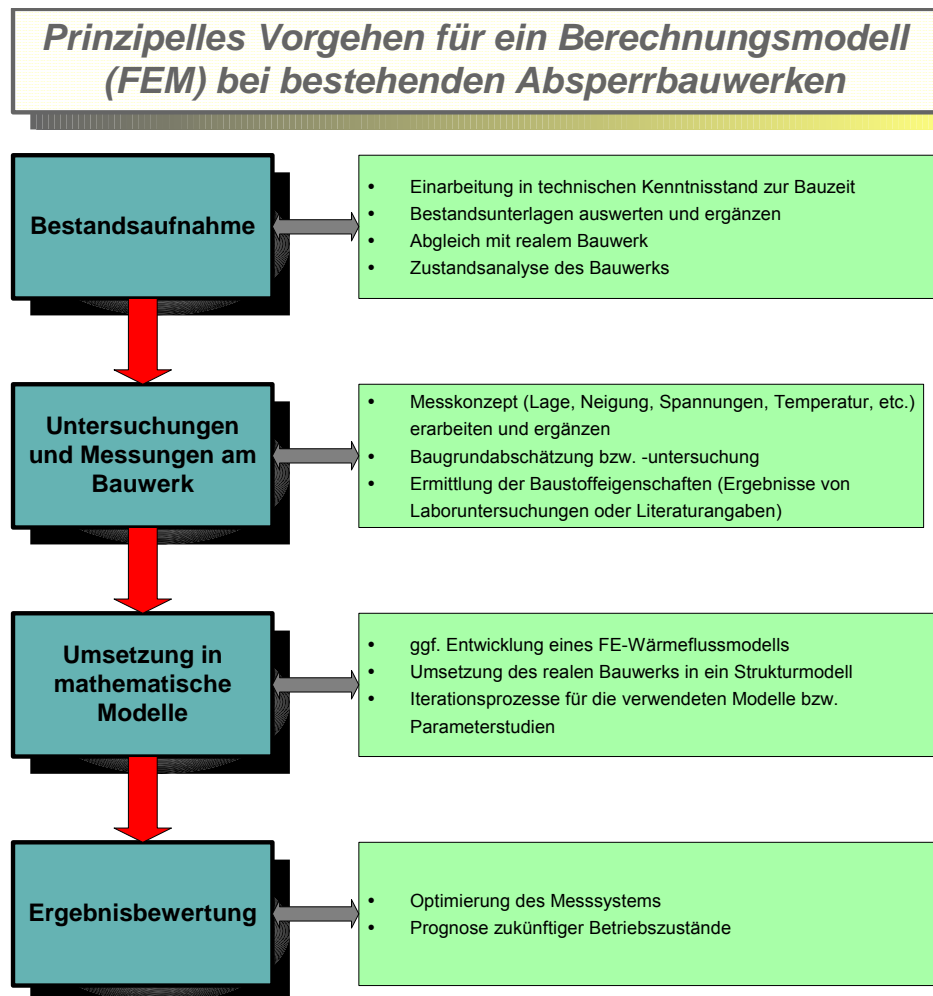


Abb. 5.4: Prinzipielles Vorgehen für ein Berechnungsmodell bei bestehenden Absperrbauwerken

Die Messungen an der Okerstaumauer haben frühzeitig belegt, dass die betragsmäßig größten Verformungsänderungen im Betriebszustand durch Änderungen des Wasserdrucks sowie der Luft- und Wassertemperaturen hervorgerufen werden. Ihre jeweiligen Anteile an der Gesamtverformungsänderung haben die gleiche Größenordnung, wobei jedoch die erzeugten Verformungsanteile gleich- oder entgegengerichtet verlaufen können. Mit den Messungen lässt sich nur die Gesamtheit einer Bewegung oder Verformung erfassen. Es ist jedoch keine Zuordnung auf die verschiedenen Ursachen der Bewegung oder Verformung möglich. Die Aufteilung der Gesamtverformungsänderungen auf die stauhöhen- und temperaturinduzierten Anteile wurde deshalb mit Hilfe der FEM untersucht. In der Berechnung wurden nur die Zustandsänderungen zwischen zwei Zeitpunkten berücksichtigt, vgl. Kap. 5.2.6. Dementsprechend werden nur die Einwirkungen in der Berechnung berücksichtigt, die sich im Laufe der Zeit ändern.

Weiterhin sollten die Untersuchungen zeigen, ob das tatsächliche Verformungsverhalten der kombinierten Staumauer der vorgegebenen Konstruktion aus Bogenmauer mit aufgesetzter Schwergewichtsmauer folgt. Für diese Fragestellung müssen die Fugen in der Gewichtsstaumauer modelliert werden. Eine Vernachlässigung der Fugenwirkung im Gewichtsmauerteil würde zu einer Verfälschung des Tragverhaltens führen, denn ohne die Fugenwirkung könnte sich in der gesamten Staumauer eine Bogenwirkung einstellen.

Andere Details werden bei der Idealisierung vernachlässigt, weil sie für die Fragestellung keine Auswirkung zeigen, so werden beispielsweise die Kontrollgänge und –schächte sowie sämtliche Auf- und Einbauten nicht berücksichtigt.

Die Untersuchung des Verformungsverhaltens der Okertalsperre stellt eine komplexe Fragestellung dar, daher wurden im Vorfeld der eigentlichen Modellerstellung bzw. parallel zur Hauptrechnung Pilotstudien an vereinfachten Modellen durchgeführt, um die getroffenen Annahmen und Idealisierungen zu verifizieren. Auf die vereinfachten Modelle und die Ergebnisse wird im Rahmen der Arbeit nicht näher eingegangen. Die daraus resultierenden Erkenntnisse sind in das hier beschriebene endgültige FE-Modell eingeflossen.

5.2.2 Verwendetes Koordinatensystem

ANSYS erlaubt für die Eingabe der Modellgeometrie die Verwendung verschiedener globaler und lokaler Koordinatensysteme, um die Modellerstellung zu vereinfachen. Für die dreidimensionale geometrische Modellierung der Staumauer und des umgebenden Gebirges ist das von ANSYS vordefinierte globale zylindrische Koordinatensystem, vgl. Abb. 5.5, gut geeignet, da die Staumauer im Grundriss einen Kreisbogen beschreibt. Dementsprechend beschreibt die x-y-Ebene des Koordinatensystems die Grundrissebene der Staumauer und die z-Achse beschreibt die Höhenachse der Mauer. Die 1. Koordinate gibt den Radius R des Kreisbogens an, beschreibt also für die Staumauer die Richtung zur Wasser- bzw. Luftseite, und die 2. Koordinate gibt den Winkel θ des Kreisbogens an. Der Koordinatenursprung liegt im Mittelpunkt des Kreisbogens. Der Ursprung der z-Achse wurde so festgelegt, dass die Ordinate $z=0$ genau 200 m unter der Oberkante der Schwergewichtsmauer liegt, damit bei der Modellerstellung der Mauer und des umgebenden Untergrunds ausschließlich mit positiven Koordinaten gearbeitet werden kann.

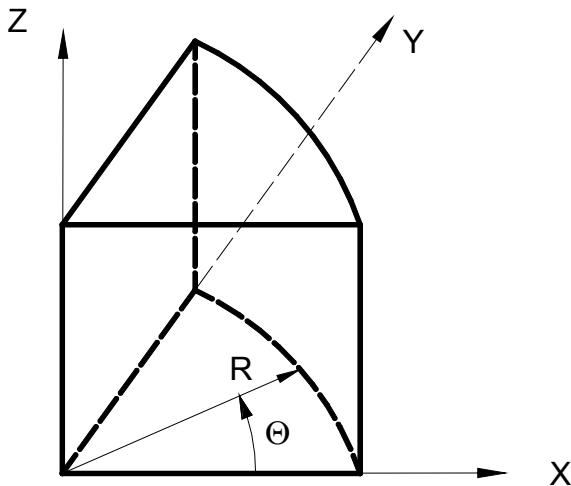


Abb. 5.5: Verwendetes globales zylindrisches Koordinatensystem in ANSYS [nach 119]

5.2.3 Idealisierung der Staumauergeometrie

Die Geometrie des FE-Modells basiert auf den technischen Unterlagen, den Ausführungszeichnungen und dem im August 2002 mit einem Tachymeter erstellten Aufmaß. Die Okerstaumauer wurde dreidimensional modelliert, um die räumliche Tragwirkung zu berücksichtigen. Eine Reduktion auf ein zweidimensionales Modell ist nicht möglich, da die Bogenwirkung berücksichtigt werden muss. Das erstellte Geometriemodell wurde sowohl für die Temperaturfeldanalyse als auch für die Strukturberechnung verwendet.

Die Sperrenstelle der Okertalsperre weist eine unsymmetrische Talform und damit einhergehend auch eine stark unsymmetrische Felseinbindung der Mauer auf. Daher konnten bei der Modellerstellung keine Symmetrien ausgenutzt werden. Dies wurde bei der Überprüfung der Verformungsmessungen auf ein mögliches symmetrisches Verformungsverhalten bestätigt. Für die Berechnung der kombinierten Bogen-Gewichtsstaumauer ist demnach ein 3D-Modell des gesamten Absperrbauwerks und eines angemessen großen Ausschnitts des Untergrunds erforderlich. Daher wurden die komplette Staumauer und der anstehende Fels geometrisch modelliert. Vernachlässigt wurden lediglich die seitlich abschließenden Flügelmauern, die die Talabriegelung sicherstellen. Modelltechnisch wurde die Talabriegelung durch einen vergrößerten Felsbereich erzielt. Diese Abstrahierung der Realität hat keinen Einfluss auf das Bauwerksverhalten. Das Modell der Staumauer und des umgebenden Felsens umfasst einen Kreisbogen von 180°, vgl. Abb. 5.6 und Abb. 5.7.

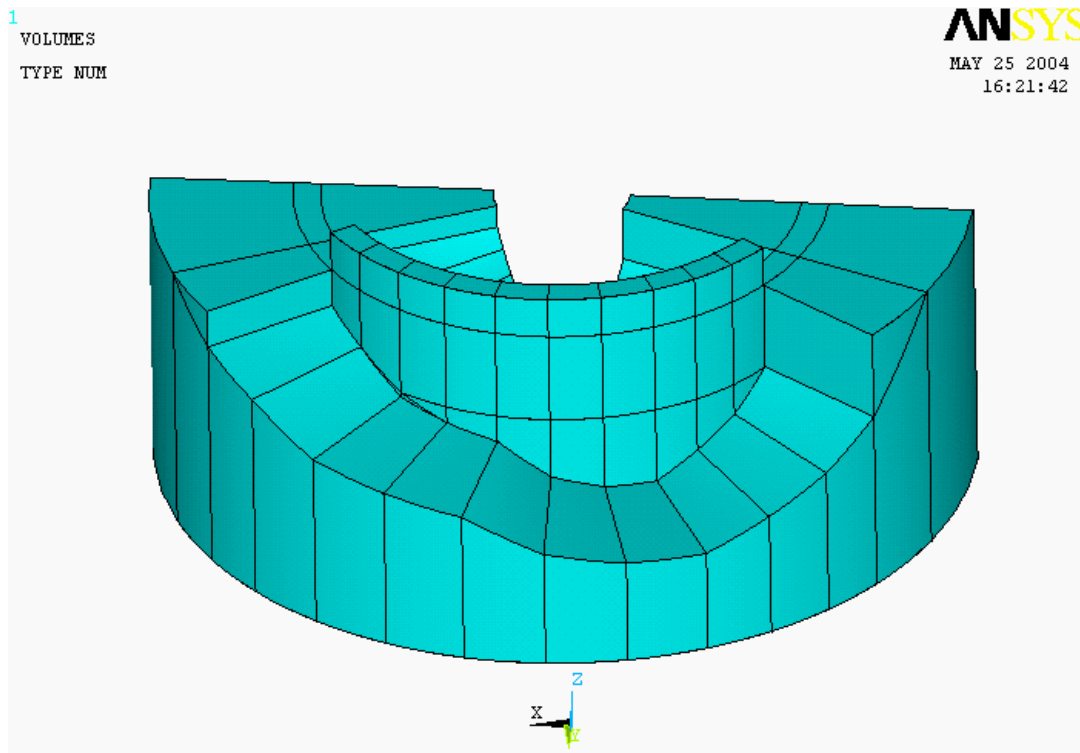


Abb. 5.6: Geometrie des FE-Modells von der Wasserseite

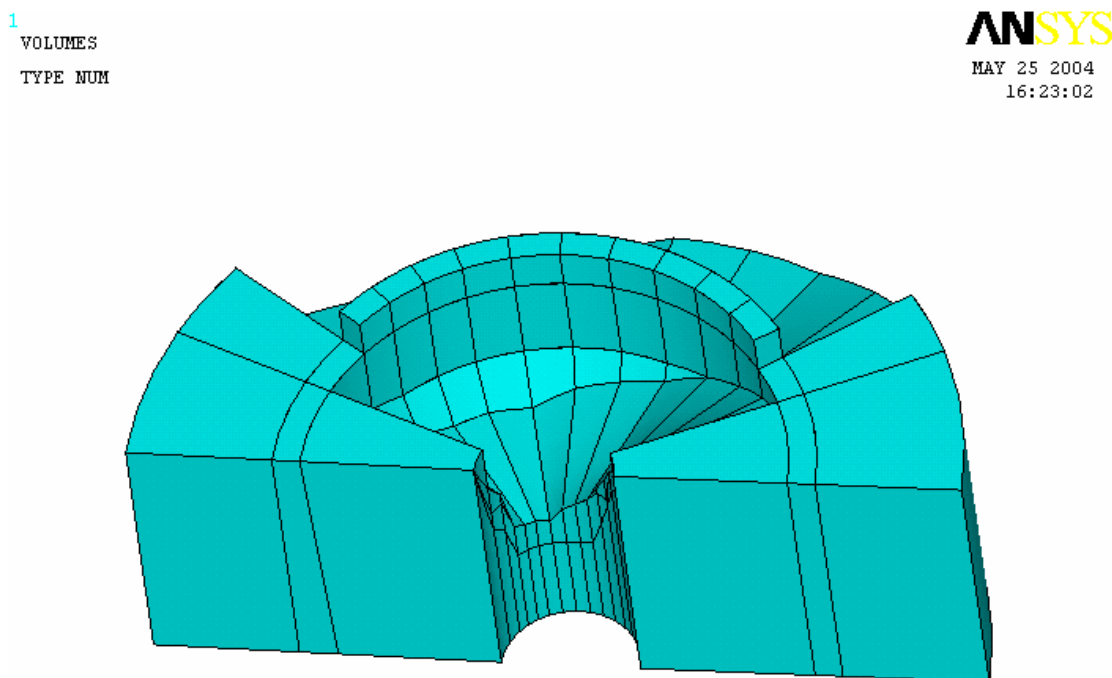


Abb. 5.7: Geometrie des FE-Modells von der Luftseite

Um das Zusammenspiel des Mauer-Untergrund-Systems bei der Simulation zu erfassen, wurde der angrenzende, modellierte Felsausschnitt so dimensioniert, dass die Einflüsse aus den Stauhöhenschwankungen und den Temperaturänderungen bis an die Modellgrenzen abgeklungen sind. Die Stärke der modellierten Felsschicht unter dem Mauerfuß entspricht ungefähr der Staumauerhöhe. Wasser- und luftseitig wurde jeweils eine Felsbreite von ca. 50 m berücksichtigt. Die Felswiderlager im Osten und Westen haben annähernd die Breite von zwei Mauerblöcken, also von rund 30 m. Durch die Zuweisung eines eigenen Materialtyps und die entspre-

chende Wahl des Verformungsmoduls konnte ein größerer Felsbereich simuliert werden, da zwischen zwei V-Moduln und der zugehörigen Ausdehnung des Felsbereichs näherungsweise eine lineare Abhängigkeit gemäß Gleichung [5.7] besteht, vgl. Kap. 5.2.4. Die Parameterstudie des V-Moduls im Widerlagerbereich, die im Kap. 6.5.3 ausführlich behandelt wird, führte zu einer Simulation des Felsbereichs mit der 1,5-fachen Ausdehnung des geometrischen Modells, d.h. durch den V-Modul des Widerlagers im Verhältnis zu dem des übrigen Felsens wird eine rechnerische Widerlagerstärke von ca. 45 m erzeugt.

Die systemeigene Macrosprache von ANSYS vereinfacht die Dateneingabe der komplexen Geometrie erheblich und erlaubt den parametrisierten Aufbau des Modells. In der Anlage sind einige Batch-Files für die Modellerstellung erläutert.

Abb. 5.9 zeigt den idealisierten, abstrahierten Mauerquerschnitt sowie die für das dreidimensionale geometrische Modell verwendeten Parameter. Bis zu einer Höhe von 42 m unterhalb der Mauerkrone hat das Mauermodell, genau wie das reale Bauwerk, eine einheitliche Breite von 8 m. Darunter nimmt die Mauerbreite bis auf maximal ca. 20 m linear zu. Aufgrund der realen Bauwerksabmessungen erfolgte die Geometrieerstellung blockweise, damit konnten Querschnittsänderungen sinnvoll im Modell berücksichtigt werden. Zudem konnte so die Fugenausbildung im Schwergewichtsmauerteil direkt generiert werden.

Abb. 5.8 zeigt im Längsschnitt der Mauer die Bauwerkskanten gemäß der Bauausführung sowie den für das Modell idealisierten Verlauf und analog die realen und idealisierten Felskanten.

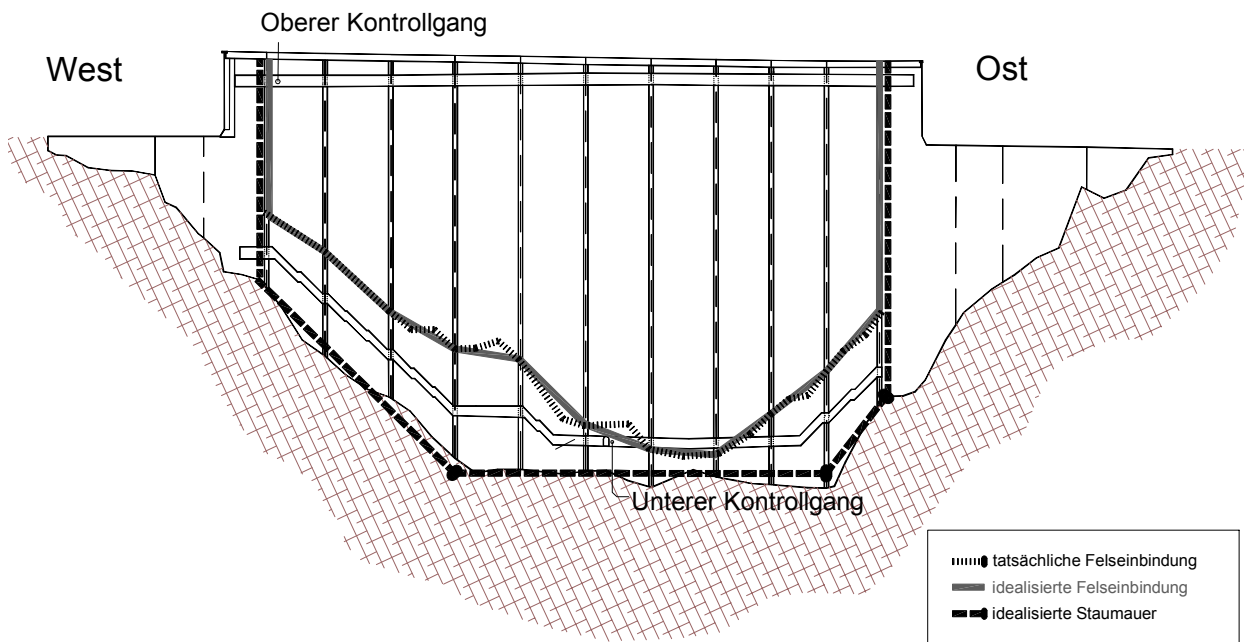


Abb. 5.8: Längsschnitt der Okerstaumauer mit realen und idealisierten Abmessungen (Blick von der Wasserseite)

Parameter	Einheit	Beschreibung	Bemerkung
Zsgm	m	Oberkante Schwergewichtsmauer	
Zok	m	Höhe Oberer Kontrollgang	
Zbm	m	Oberkante Bogenstauwehr	
Zqa1	m	Höhe Beginn Verbreiterung Querschnitt	
Zmaxbi	m	Höhe größte Mauerbreite	Querschnittsabhängig
Zmfi	m	Höhe Mauerfußpunkt	Querschnittsabhängig
Zfwi	m	Höhe Felseinbindung wasserseitig	Querschnittsabhängig
Zfli	m	Höhe Felseinbindung luftseitig	Querschnittsabhängig
Zfa	m	Höhe Abschluss Felsmodell	
Zw	m	Höhe Wasserstand	
Rw	m	Radius zur Wasserseite	
RI	m	Radius zur Luftseite	
Rmaxbi	m	Radius größte Mauerbreite	Querschnittsabhängig
Rmf	m	Radius Mauerfußpunkt	
Rfli	m	Radius Felseinbindung luftseitig	Querschnittsabhängig
Rfaw	m	Radius Abschluss Felsmodell wasserseitig	
Rfal	m	Radius Abschluss Felsmodell luftseitig	
tetai	°	Winkel zur Lagebestimmung des Querschnitts	Querschnittsabhängig

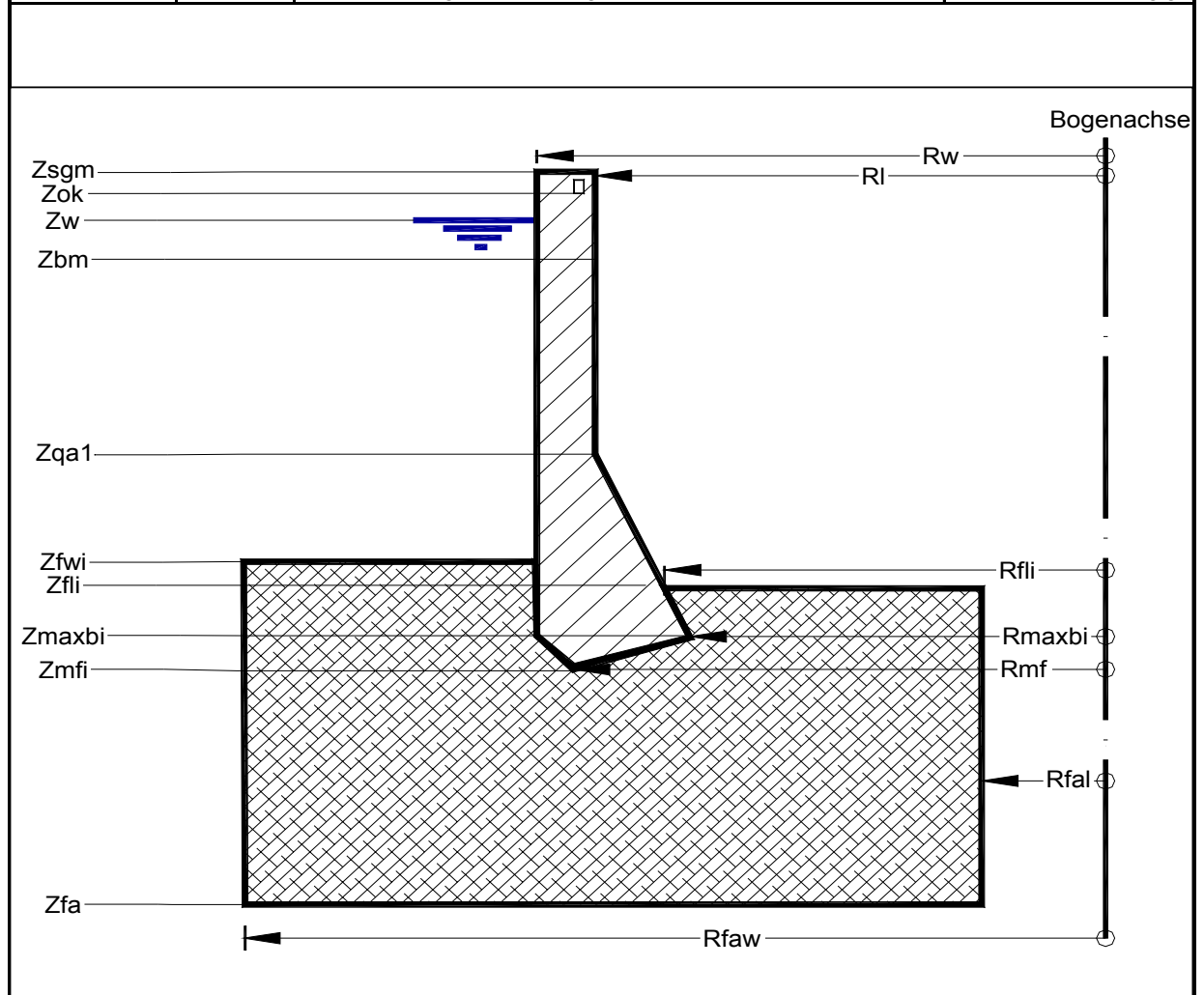


Abb. 5.9: Parameterdefinition des idealisierten 3D-Modells

5.2.4 Idealisierung des Materialverhaltens

5.2.4.1 Definition des Verformungsmoduls und verwendetes Materialgesetz

Aufgrund der unterschiedlichen Definitionen für den Elastizitäts- und Verformungsmodul in der Felsmechanik und im Betonbau wird als Grundlage für die vorliegende Arbeit der Begriff des Verformungsmoduls definiert und in dieser Definition nachfolgend verwendet. Bei beiden Begriffen handelt es sich um den Kennwert für die Steifigkeit des Materials.

In der Felsmechanik gibt es keine genormte eindeutige Definition für den Elastizitäts- und Verformungsmodul. In [111] wird der Elastizitätsmodul, kurz E-Modul, beispielsweise als so genannter Anfangsmodul definiert, der das Verhältnis der Proportionalitätsgrenze σ_p zur zugehörigen Längsdehnung ε_l , vgl. Abb. 5.10, beschreibt. Den Verformungsmodul, kurz V-Modul, definiert er als Sekanten- oder Tangentenmodul aus der ermittelten Arbeitslinie nach Abb. 5.10, unabhängig davon, ob und in welchem Umfang die aufgetretenen Verformungen elastische, plastische oder viskose Anteile aufweisen.

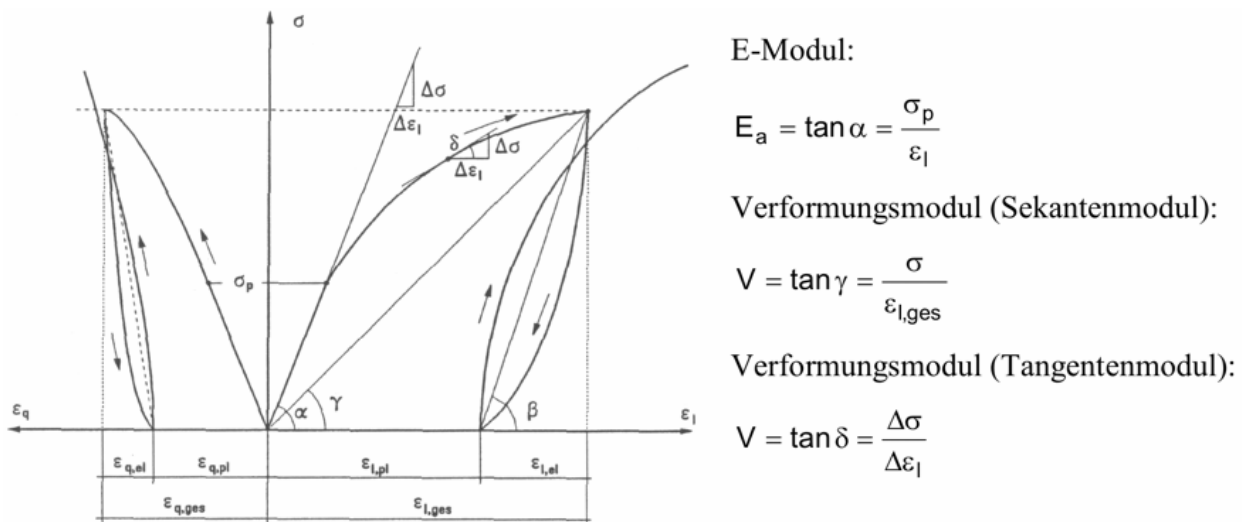


Abb. 5.10: Prinzipiskez zur Bestimmung der Verformungsparameter in der Felsmechanik nach [111]

Dagegen wird z. B. in [173] der Verformungsmodul als Quotient aus der Spannungsänderung und der Längsdehnungsänderung auf dem linearen Abschnitt der Arbeitskurve bei Erstbelastung nach Abb. 5.11 definiert. Der Elastizitätsmodul wird in [173] als Verhältnis der Spannungsänderung zur Längsdehnungsänderung auf dem Wiederbelastungsast definiert, vgl. Abb. 5.11.

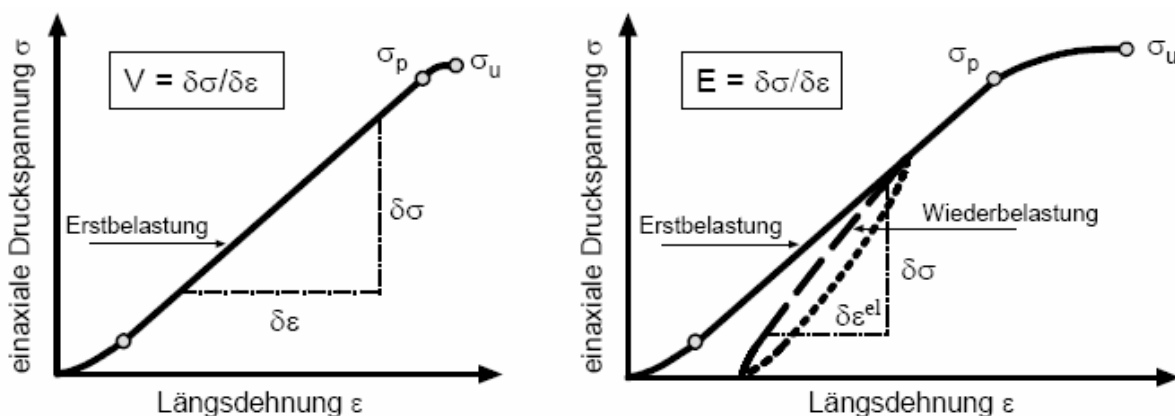


Abb. 5.11: Definition des E- und V-Moduls nach [173]

Kurz gesagt kennzeichnet der Verformungsmodul in der Felsmechanik einen speziell zu definierenden E-Modul aus der Arbeitslinie, der jedoch nicht einheitlich festgelegt ist.

Der statische E-Modul des Betons wird nach DIN 1048 als Sekantenmodul bei der 11. Belastung des Probekörpers ermittelt, wobei die obere Prüfspannung der rechnerisch ausnutzbaren Spannung im Bauwerk oder einem Drittel der Druckfestigkeit entsprechen soll. Er ergibt sich als Quotient aus der aufgetragenen Spannung und der zugehörigen, gemessenen Dehnung. Durch die vorangegangenen Lastwechsel wird erreicht, dass sich bei der anschließenden Belastung praktisch nur noch elastische Formänderungen einstellen, denn die bleibenden viskosen und verzögert elastischen Verformungen sind nach [180] bei den ersten Lastwechseln besonders groß und klingen mit zunehmender Zahl der Belastungszyklen ab. Bei dem E-Modul von Beton handelt es sich also um eine Konvention, die in der DIN 1048 festgelegt ist.

Für Beton gilt unter Druckbeanspruchung zudem, dass er dem Hooke'schen Gesetz annähernd solange folgt, wie die Spannung unter etwa 40% der Bruchfestigkeit bleibt. Oberhalb dieses Wertes neigt sich die Spannungs-Verformungs-Kurve allmählich bis zum Bruch [179] und das Materialverhalten ist nichtlinear.

Um Missverständnisse aus den verschiedenen Definitionen der Begriffe E- und V-Modul zu vermeiden, wird nachfolgend nur noch einheitlich vom Verformungsmodul gesprochen.

Die regelmäßigen Kontrollmessungen der Harzwasserwerke GmbH und auch die Messungen, die im Rahmen der Untersuchung der Staumauer durchgeführt wurden, belegen sehr kleine Verformungsänderungen im Betriebszustand. Diese Messergebnisse lassen darauf schließen, dass sich die im Betriebszustand der Staumauer auftretenden Spannungen und Dehnungen in einem schmalen Bereich des Spannungs-Dehnungs-Diagramms bewegen, vgl. Abb. 5.12. Unter dieser Voraussetzung darf bei der Berechnung von einem linear-elastischen Materialverhalten ausgegangen werden.

Diese Annahme wurde nach den ersten Berechnungen anhand der auftretenden Spannungen und Dehnungen im Berechnungsmodell verifiziert. Die Ergebnisse sind als Spannungs-Dehnungs-Diagramm in Abb. 5.12 dargestellt. Die Druckfestigkeit σ_{CB} wurde beim Bau der Staumauer an Würfeln aus Grobrüttelbeton mit 1m Kantenlänge bestimmt. Die mittlere Festigkeit ergab einen Wert von etwa $\sigma_{CB} = -30 \text{ N/mm}^2$. Die zugehörige Grenzstauchung (negative Dehnung) beträgt $\epsilon_{CB} = -2 \text{ ‰}$. Rechnerisch wurde bei der Überprüfung der auftretenden Spannungen und Dehnungen im Betriebszustand zum einen lediglich das Eigengewicht der Staumauer als Einwirkung berücksichtigt. Daraus resultieren die Spannung $\sigma_{CG} \approx -8 \text{ N/mm}^2$ und die zugehörige Dehnung $\epsilon_{CG} \approx -0,2 \text{ ‰}$. Zum anderen wurde rechnerisch der Zustand des Vollstaus der Talsperre simuliert, d. h. neben dem Eigengewicht tritt der maximal mögliche hydrostatische Wasserdruck als Einwirkung auf. Die zugehörige Spannung beträgt $\sigma_{CG+p} \approx -11 \text{ N/mm}^2$ und die Dehnung $\epsilon_{CG+p} \approx -0,3 \text{ ‰}$. Die Einbeziehung von Einwirkungen infolge von Temperaturänderungen ergeben Spannungs- und Dehnungswerte in dem gleichen Wertebereich.

Die Okerstaumauer hat in ihren knapp 50 Jahren Betriebszeit jährlich hunderte von Belastungszyklen durch Stauhöhenschwankungen und Temperaturänderungen erfahren, so dass sich praktisch nur noch elastische Formänderungen infolge der Einwirkungen im Betriebszustand einstellen. Die andauernden Wiederbelastungen bilden eine Hystereseschleife, wie sie in Abb. 5.12 zu erkennen ist. Die Steigung der Be- und Entlastungsäste ist dabei nahezu gleich bleibend. Der verwendete Verformungsmodul ergibt sich entsprechend Abb. 5.12 als Sekantenmodul.

$$V = \frac{\Delta\sigma_c}{\Delta\varepsilon_c} \quad [5.6]$$

mit

V Verformungsmodul

$\Delta\sigma_c$ Spannungsdifferenz

$\Delta\varepsilon_c$ Dehnungsdifferenz.

Die Änderungen der hydrostatischen und thermischen Einwirkungen erzeugen also sehr kleine reversible Verformungen, das heißt die Berechnungen dürfen nach den Grundsätzen der klassischen Elastizitätstheorie erfolgen. Die zugehörigen Spannungswerte erreichen die zuvor genannte Obergrenze von 40% der Bruchfestigkeit nicht. Damit gilt das Hooke'sche Gesetz und die Anteile an der Gesamtverformung der Staumauer, die aus den einzelnen Einwirkungen resultieren, sind superponierbar.

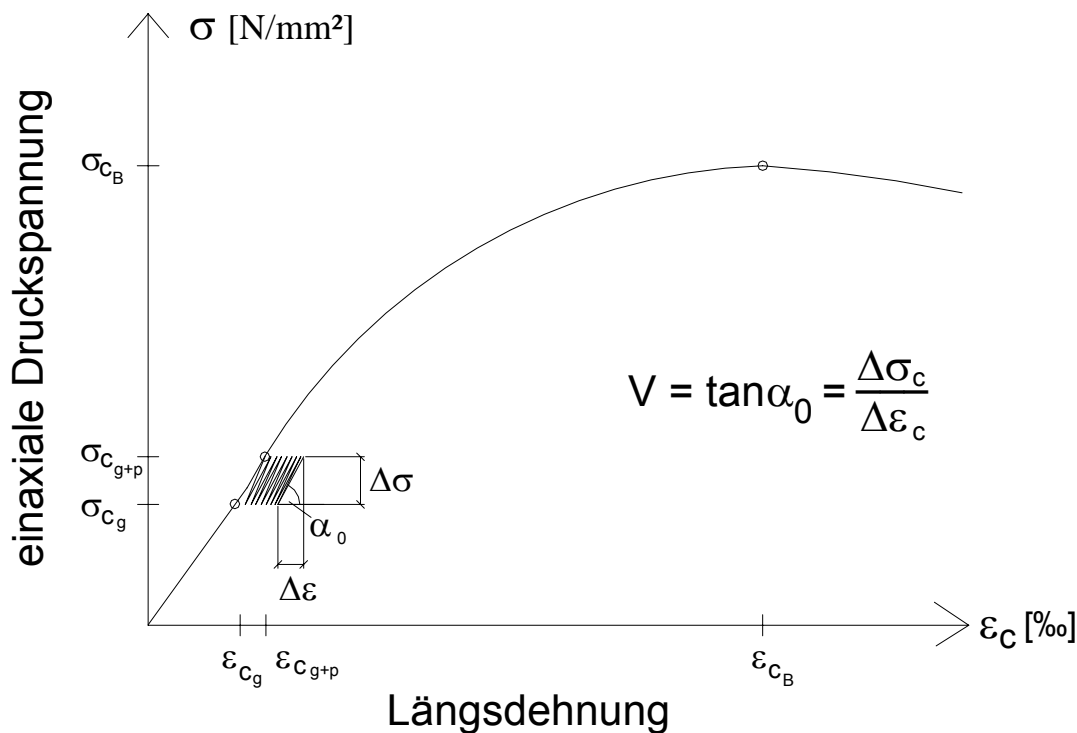


Abb. 5.12: Spannungs-Dehnungs-Diagramm des Grobrüttelbetons der Okerstaumauer

Die Materialeigenschaften des Grobrüttelbetons konnten entsprechend auf den Untergrund übertragen werden. Dabei wird aus den genannten Gründen für die FEM-Analyse von isotropem und homogenem Material ausgegangen, obwohl der anstehende Fels durch Klüfte und Verwitterungen heterogen und anisotrop ist. Durch die Untergrundverpressungen beim Bau der Staumauer wurden das heterogene und anisotrope Materialverhalten des Felsens teilweise kompensiert.

Es kann folglich sowohl für den Staumauerbeton als auch für den Untergrund als V-Modul ein Sekantenmodul aus dem Spannungs-Dehnungs-Diagramm und ein linear-elastisches Materialgesetz angewendet werden.

Insgesamt wurden für das Berechnungsmodell der Okerstaumauer drei Materialbereiche unterschieden. Einen Materialtyp kennzeichnet der Grobrüttelbeton der Staumauer. Für den Untergrund wurden weitere zwei Materialbereiche unterschieden, um im Widerlagerbereich einen größeren Felsbereich durch einen separaten Verformungsmodul zu simulieren. Für eine annähernd reine Druckbeanspruchung, wie sie im Fall der Okerstaumauer auftritt, kann zwischen zwei V-Moduln und der zugehörigen Ausdehnung (Länge) des Felsbereichs näherungsweise von einer linearen Abhängigkeit gemäß Gleichung [5.7] ausgegangen werden.

$$V_1 = V_0 \cdot \frac{l_0}{l_1} \quad [5.7]$$

mit

V_0	Verformungsmodul des Fels
V_1	veränderter Verformungsmodul zur Simulation einer geänderten Ausdehnung des Felsbereichs
l_0	wahre Ausdehnung des Felsbereichs
l_1	simulierte Ausdehnung des Felsbereichs

Damit kann beispielsweise durch die Halbierung des V-Moduls des Fels ein Felsbereich mit doppelter Längenausdehnung simuliert werden.

5.2.4.2 Die Materialparameter

Die Kenntnisse über die aktuellen Materialparameter sind vage, da nur wenige Materialkennwerte des Staumauerbetons und des Untergrundes punktuell zum Zeitpunkt des Baus bekannt sind. Vor ca. 15 bis 20 Jahren wurden zudem Untergrundinjektionen zur Verbesserung des anstehenden Untergrundes durchgeführt, über die keine Angaben zur Verfügung stehen. Die Materialien der Mauer und des Untergrundes unterliegen zudem einem weitgehend unbekannten Alterungsprozess. Die experimentelle Bestimmung der Materialkennwerte war an der Okerstaumauer nicht möglich, da aus der Mauer keine Proben entnommen werden konnten. Die Materialkennwerte, die an einer einzelnen Probe ermittelt worden wären, wären zudem nicht signifikant für das Material des gesamten Bauwerks gewesen. Daher stellen die Materialkennwerte, die vor bzw. während des Baus der Staumauer ermittelt oder aus Fachliteratur entnommen wurden, die Grundlage der FEM-Studie dar, vgl. Tab. 5.3. Die Quelle ist jeweils in der ersten Spalte unter der Bezeichnung des Materialkennwerts angegeben. Für einige Materialkennwerte können aus der Literatur nur Spannweiten der Werte angegeben werden.

Die Verformungsmoduln für den Staumauerbeton und den Untergrund aus Tab. 5.3 beruhen auf Angaben der Harzwasserwerke GmbH. In Kap. 5.2.4.1 wurde bereits auf die Einzelheiten der V-Moduln eingegangen. Durch Parameterstudien wurden Arbeitswerte der Verformungsmoduln für die Okerstaumauer ermittelt.

Materialkennwerte		Grobrüttelbeton	Tonschiefer - vor Baugrundverbesserung
Verformungsmodul Laboruntersuchung, vgl. [154] und [155]	[N/mm ²]	36.700,00	12.000,00 (vor Baugrundverbesserung bei Baubeginn)
Verformungsmodul Rechenwert Statik, vgl. [134]	[N/mm ²]	30.000,00	-
Dichte Laboruntersuchungen, vgl. [154] und [155]	[t/m ³]	2,60	2,60
Querdehnzahl [DIN 1045]	[-]	0,15 bis 0,25	-
Wärmedehnzahl [177], [62]	[1/K]	$5 \cdot 10^{-6}$ bis $14 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$ bis $11,5 \cdot 10^{-6}$
Wärmeübergangskoeffizient Luft - Beton [DIN 4108]	[W/(m ² K)]	25	
Wärmeübergangskoeffizient Wasser - Beton [DIN 4108]	[W/(m ² K)]	46	
Wärmeleitfähigkeit [180], [151]	[W/(mK)]	2,10 bis 3,50	2,3
Spez. Wärmekapazität [167], [180]	[J/(kg · K)]	950 bis 1200	950 bis 1200
Reales Materialgesetz	[-]	viskoelastisch	elastisch-viskoplastisch

Tab. 5.3: Materialkennwerte aus dokumentierten Laborversuchen und Literatur

Die Dichte wurde durch Laboruntersuchungen ermittelt. Der Wert der Dichte beeinflusst die Berechnung nur indirekt, da das Eigengewicht bei Betrachtung der Einwirkungsdifferenzen entfällt. Die Dichte beeinflusst jedoch u. a. die Wärmeleitfähigkeit des Betons, die mit zunehmender Dichte und damit mit abnehmender Porigkeit des Staumauerbetons ansteigt, vgl. [180].

Der Wärmeübergangskoeffizient wird im Wesentlichen von der Dichte des umgebenden Mediums und der Strömungsgeschwindigkeit beeinflusst. Bei der Okerstaumauer treten an der Maueroberfläche keine nennenswerten Strömungen auf, so dass die Werte gemäß Tab. 5.3 für die Berechnungen verwendet wurden.

Die Werte für die Wärmekapazität von Beton werden in [180] mit 950 bis 1200 J/(kg·K) angegeben. In [167] ist die Wärmekapazität des Betons der Gewichtsmauer Gottleuba mit 1050 J/(kg·K) angegeben. Eine Durchfeuchtung der Mauer kann zu Abweichungen von diesem Wert führen. Die Wärmekapazität wurde jedoch nicht durch eine Parameterstudie untersucht, weil bereits die Wärmeleitfähigkeit Bestandteil einer Sensitivitätsstudie war und in die Temperaturfeldberechnung nur der Quotient aus Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit eingeht. Dies gilt jedoch nur, wenn die Wärmeleitfähigkeit, wie im Fall der Okerstaumauer, nicht richtungsab-

hängig ist und keine Wärmequellen im Mauerkörper existieren. Durch die Umstellung der DGL für instationäre, zeitabhängige Temperaturfeldprobleme, siehe Gleichung [5.4], unter Beachtung der Randbedingungen

$$\lambda = \lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 \quad [5.8]$$

und

$$f_{(x,y,z)} = 0 \quad [5.9]$$

ergibt sich

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} = \frac{c}{\lambda} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad [5.10]$$

mit

λ Material-Wärmeleitfähigkeit

c Material-Wärmekapazität ($c = c_p \cdot \rho$)

mit

c_p spezifische Wärmekapazität des Materials

ρ Dichte des Materials

T Temperatur

x, y, z Koordinaten bzw. Länge

t Zeit

$f_{(x, y, z)}$ Funktion für innere Wärmequellen.

Daher wurde die Wärmekapazität auf den Wert von 1050 J/(kg·K) festgelegt und ausschließlich die Wärmeleitfähigkeit variiert, vgl. Kap. 6.4.1.

Für die Wärmeleitfähigkeit sind in der Literatur, vgl. Tab. 5.3, Werte zwischen 2,1 W/(m·K) und 3,5 W/(m·K) angegeben. Die Wärmeleitfähigkeit kann, in Abhängigkeit von der Art der Zuschlagstoffe für den Beton und dem Grad der Materialdurchfeuchtung, stärker schwanken. Daher wurde ein Arbeitswert für die Wärmeleitfähigkeit der Okerstaumauer mit Hilfe einer Parameterstudie ermittelt, auf den in Kap. 6.4.1 näher eingegangen wird.

Die Querdehnzahl von Beton variiert gemäß DIN 1045 zwischen Werten von 0,15 bis 0,25. Für die Okerstaumauer wurde die Querdehnzahl mit dem Mittelwert von 0,2 festgelegt, da die Ergebnisse der Vorstudien bereits belegen, dass die Variation der Querdehnzahl zu keiner nennenswerten Änderung der Verformungsdifferenzen führt.

Der Wärmeausdehnungskoeffizient wird mit Werten zwischen $5 \cdot 10^{-6}$ bis $14 \cdot 10^{-6}$ für den Beton und zwischen $2,5 \cdot 10^{-6}$ bis $11,5 \cdot 10^{-6}$ für die Grauwacke bzw. den Tonschiefer des Untergrunds angegeben. Er wird durch die Feuchtigkeit des Materials beeinflusst und beim Beton zusätzlich durch den Wärmeausdehnungskoeffizienten der Zuschlagstoffe. Auch der Wert des Wärmeausdehnungskoeffizienten wurde durch eine Parameterstudie abgestimmt.

Die Materialkennwerte aus Tab. 5.3 bilden die Grundlage für die rechnerische Analyse des Staumauerverhaltens. Im Rahmen von Sensibilitätsstudien wurde der Einfluss der verschiedenen Materialparameter auf das Verformungsverhalten der Staumauer und des Felsuntergrundes untersucht. In Tab. 5.4 sind die untersuchten Wertebereiche der Materialkennwerte für die transiente Temperaturfeldanalyse, die in Kap. 5.2.7 ausführlich behandelt wird, und die Strukturanalyse, die in Kap. 5.2.8 erläutert wird, angegeben (blau hinterlegt).

Materialkennwerte		Staumauer	Untergrund	Widerlager
Verformungsmodul	[N/mm ²]	30.000,00 bis 40.000,00	12.000,00 bis 30.000,00	12.000,00 bis 24.000,00
Dichte	[t/m ³]	2,60	2,60	2,60
Querdehnzahl	[-]	0,2	0,2	0,2
Wärmedehnzahl	[1/K]	$2,5 \cdot 10^{-6}$ bis $10 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$ bis $10 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$ bis $10 \cdot 10^{-6}$
Wärmeübergangskoeffizient Luft - Beton	[W/(m ² K)]	25		
Wärmeübergangskoeffizient Wasser - Beton	[W/(m ² K)]	46		
Wärmeleitfähigkeit	[W/(mK)]	2,50 bis 4,00	2,50 bis 4,00	2,50 bis 4,00
Spez. Wärmekapazität	[J/(kg · K)]	1050	1050	1050
Idealisiertes Materialgesetz	[-]	linear- elastisch	linear- elastisch	linear- elastisch

Tab. 5.4: Materialkennwerte für die Sensitivitätsstudien des FE-Modells

Für die transiente Temperaturfeldanalyse wurde durch eine Parameterstudie der Wert der Wärmeleitfähigkeit bestimmt, in Kap. 6.4.1 wird die Parameterstudie detailliert behandelt. Die V-Moduln und die Wärmedehnzahl, die für die Strukturanalyse benötigt werden, wurden ebenfalls durch Sensitivitätsstudien ermittelt, die in Kap. 6.5 erläutert werden. Unter Beachtung der Genauigkeitskonvergenzen der Messungen, vgl. Kap. 4, konnten sie zur Optimierung und Verifizierung der Materialparameter herangezogen werden. Eine Zusammenstellung der endgültigen, mit Hilfe der Parameterstudien bestimmten, Arbeitswerte für die Materialkennwerte findet sich in Tab. 5.5.

Materialkennwerte		Staumauer	Untergrund	Widerlager
Verformungsmodul	[N/mm ²]	37.000,00	24.000,00	18.000,00
Dichte	[t/m ³]	2,60	2,60	2,60
Querdehnzahl	[-]	0,2	0,2	0,2
Wärmedehnzahl	[1/K]	5·10 ⁻⁶	5·10 ⁻⁶	5·10 ⁻⁶
Wärmeübergangskoeffizient Luft - Beton	[W/(m ² K)]	25		
Wärmeübergangskoeffizient Wasser - Beton	[W/(m ² K)]	46		
Wärmeleitfähigkeit	[W/(mK)]	3,50	3,50	3,50
Spez. Wärmekapazität	[J/(kg ·K)]	1050	1050	1050
Idealisiertes Materialgesetz	[-]	linear- elastisch	linear- elastisch	linear- elastisch

Tab. 5.5: Materialkennwerte, die im Rahmen der Sensitivitätsstudien ermittelt wurden

5.2.5 Elementtyp und Diskretisierung

ANSYS verfügt über eine umfangreiche Bibliothek von Elementtypen, die für die verschiedenen Fragestellungen und Berechnungstypen, wie beispielsweise Struktur-, Temperatur- oder Strömungsberechnungen, ausgelegt sind. Die verschiedenen Elementtypen unterscheiden sich in den Ansatzfunktionen, der Geometrie und der Materialmatrix.

Vor Beginn der Modellgenerierung musste eine grundlegende Entscheidung über die zu verwendenden Elemente für die Temperatursimulation getroffen werden, weil der verwendete Elementtyp den strukturellen Aufbau des Modells beeinflusst. ANSYS bietet grundsätzlich zwei Vorgehensweisen. Entweder kann eine Temperaturfeldanalyse mit anschließender Strukturanalyse durchgeführt werden oder es können gekoppelte Elemente für die Analyse verwendet werden. Im ersten Fall werden nach der Temperaturfeldberechnung die Temperaturen auf das mechanische Modell übertragen und unter dem Einfluss der Temperaturen erfolgt die Strukturberechnung. Diese Methode bietet sich an, wenn eine transiente Temperaturfeldberechnung erforderlich ist und viele Temperaturzustände zu berechnen sind, aber die daraus resultierenden mechanischen Auswirkungen nur für einige ausgewählte Zustände berechnet werden sollen. Für diese Vorgehensweise ist ein Elementtyp erforderlich, der ein entsprechendes Pendant in der thermischen bzw. strukturmechanischen Elementauswahl aufweist. Bei der zweiten Variante werden die transiente Temperaturfeldanalyse und die strukturmechanische Berechnung in einem kombinierten Rechengang von ANSYS bearbeitet. Für die hier untersuchte Fragestellung an der Okerstaumauer haben die Temperaturen Auswirkungen auf die mechanischen Spannungen und Dehnungen, in umgekehrter Richtung liegt jedoch keine Auswirkung der mechanischen Spannungen und Dehnungen auf die Temperaturen oder Wärmeleitfähigkeiten vor. Damit ist die Anwendung einer Temperaturfeldanalyse mit anschließender separater Strukturanalyse

lyse gerechtfertigt. Diese Vorgehensweise ermöglicht die Berechnung mit den Differenzen der Einwirkungen, vgl. Kap. 5.2.6.

Für das gewählte Berechnungsverfahren bietet ANSYS grundsätzlich zwei 3D-Volumenelemente. Zum einen die 3D-Volumenelemente mit acht Knoten (Solid45 für die Strukturanalyse und Solid70 für die Temperaturberechnung), vgl. Abb. 5.13, und zum anderen Elemente mit 20 Knoten (Solid95 für die Strukturanalyse und Solid90 für die Temperaturberechnung). Gegenüber den Elementen mit acht Knoten verfügen diese über zusätzliche Mittenknoten. Beide Elementtypen eignen sich für unregelmäßige Bauteile mit großen Abmessungen in allen drei Richtungen. Die Strukturelemente weisen mit den drei Translationen u_x , u_y und u_z an jedem Knoten drei Freiheitsgrade auf und sind durch orthotrope Materialeigenschaften definiert. Drücke können als Oberflächenlasten auf die Elementflächen und Temperaturen als Volumenlasten an den Elementknoten aufgebracht werden. In allen drei Raumrichtungen können Normal- und Schubspannungen sowie Dehnungen aufgenommen werden. Als Ergebnisse liegen Knotenverschiebungen und die daraus abgeleiteten Größen gemäß dem ANSYS-Handbuch [119] vor. Die entsprechenden Temperaturelemente haben dreidimensionale Wärmeleitungseigenschaften, sind für stationäre und transiente Temperaturfeldanalysen geeignet und verfügen über einen Freiheitsgrad je Knoten. Sie sind, wie die Strukturelemente, durch orthotrope Materialeigenschaften definiert. Die Umgebungstemperaturen werden als Oberflächenlasten auf die Elementflächen aufgebracht. Als Ergebnisse der Knotenfreiheitsgrade werden Knotentemperaturen berechnet. Andere thermischen Größen werden von den Knotentemperaturen abgeleitet. Weitere Angaben über die Elemente sind dem ANSYS-Handbuch bzw. der Online-Hilfe von ANSYS [3] oder der weiterführenden Literatur [26], [59] und [119] zu entnehmen.

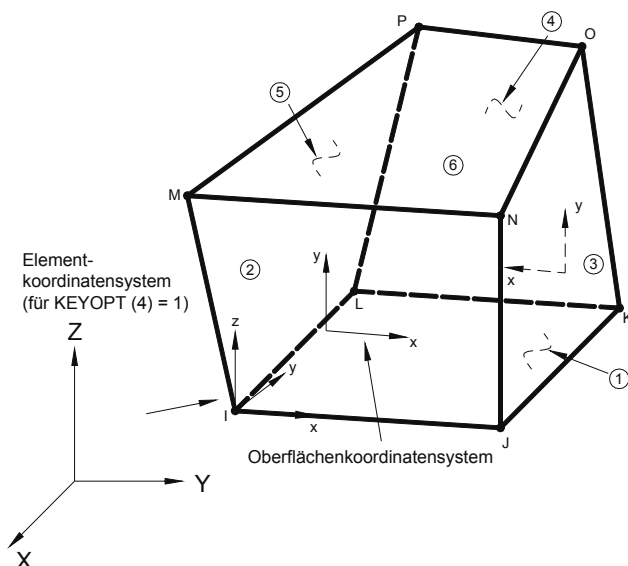


Abb. 5.13: Verwendeter Elementtyp: Solid45 3-D Structural Solid [nach 3]

Die Verwendung des Elementtyps wurde mit einer Parameterstudie untersucht, vgl. Kap. 6.1. Das Element mit 20 Knoten zeigte im Vergleich zu dem Element mit acht Knoten eine Abweichung der Ergebnisse kleiner als 5%, so dass der damit verbundene wesentlich höhere Berechnungsaufwand nicht gerechtfertigt ist.

Für die Diskretisierung des Modells wurde auf die umfangreichen Optionen und Werkzeuge der Netzgenerierung durch ANSYS zurückgegriffen. Dabei wurden das Netz und die Elementabmessungen durch Parameter, Voreinstellungen und Nachbesserungen von Hand gesteuert. Die

Lage der Messpunkte wurde im FE-Netz näherungsweise durch je einen Netzknoten abgebildet, um einen direkten Vergleich der Berechnungsergebnisse mit den Messdaten zu ermöglichen. Die Elementabmessungen haben in den feindiskretisierten Bereichen, wie beispielsweise im Schwergewichtsmauerteil, minimale Kantenlängen kleiner 1 m bis hin zu maximalen Kantenlängen von 10 m im unteren Felsbereich. Die optimale Netzdichte wurde wie der Elementtyp durch eine Parameterstudie bestimmt, vgl. Kap. 6.1. Die Abb. 5.14 und Abb. 5.15 zeigen das letztlich verwendete Netz des Modells.

Die Geometrieerstellung, die Festlegung der Materialkennwerte sowie die Elementierung erfolgen im Preprozessor des FEM-Programms, vgl. Abb. 5.2.

1
ELEMENTS

ANSYS
MAY 25 2004
16:24:19

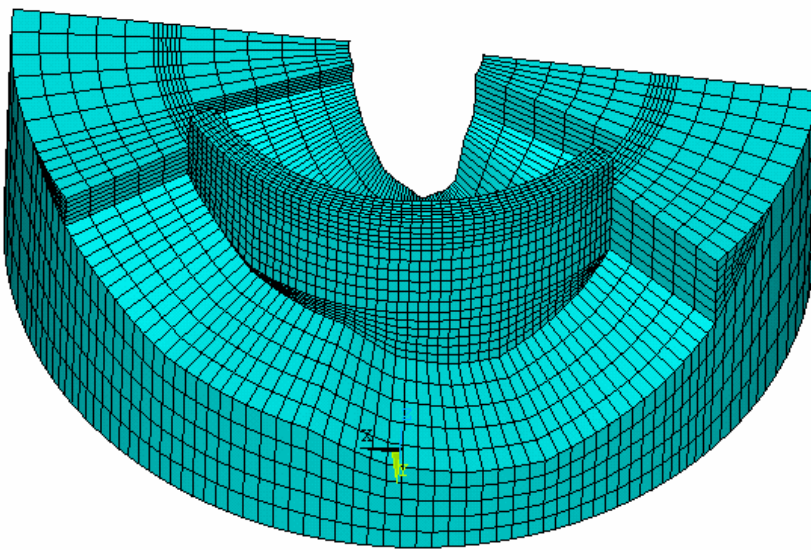


Abb. 5.14: Netz des FE-Modells von der Wasserseite

1
ELEMENTS

ANSYS
MAY 25 2004
16:23:34

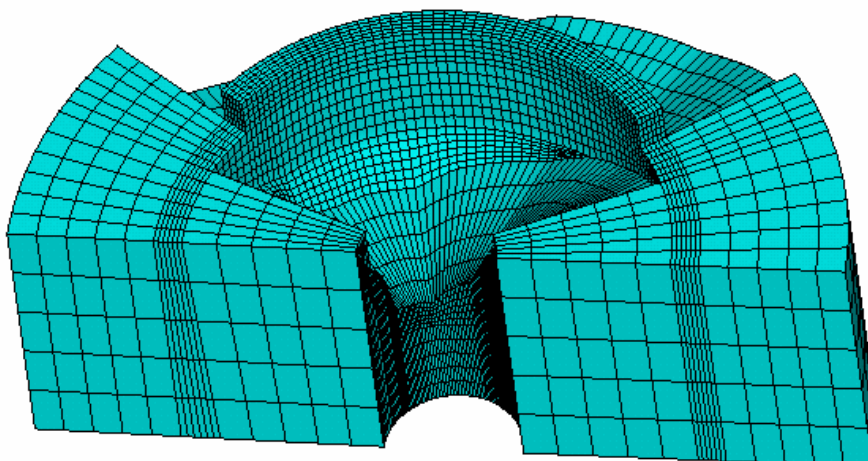


Abb. 5.15: Netz des FE-Modells von der Luftseite

5.2.6 Idealisierung der Einwirkungen

Die Einwirkungen im Betriebszustand erzeugen, wie bereits erläutert, reversible Verformungsänderungen der Staumauer. Aufgrund der Gültigkeit des Hooke'schen Gesetzes und des Superpositionsprinzips werden bei der Simulation der Einwirkungen nur die Einwirkungsdifferenzen zwischen zwei Zeitpunkten angesetzt. Eine Begründung für dieses Vorgehen liegt in den Messungen. Es wurden nur die Verformungsänderungen infolge der Umwelteinwirkungen, wie Änderung des Wasserstandes und der Temperaturen, gemessen. Es liegt keine Nullmessung vor, die eine Analyse des Verformungsverhaltens seit Bau der Staumauer ermöglichen würde. Der gewählte Berechnungsansatz, die Einwirkungen nur als Differenzen zu simulieren, wird durch die Tatsache untermauert, dass bei der Differenzbildung der Ergebnisse aus zwei Berechnungen mit den tatsächlichen Einwirkungsgrößen der Fehler vergrößert wird.

Bei der Idealisierung der Einwirkungen als Differenzzustände haben nur die Einwirkungen Einfluss, die sich im Laufe der Zeit ändern. Damit entfällt das Eigengewicht komplett und für den Wasserstand wird nur der hydrostatische Differenzdruck aus den Stauhöhen der betrachteten beiden Zeitpunkte aufgebracht. Bei der Temperaturfeldanalyse werden analog nur die Differenzen der Temperaturen verwendet, die das Bauwerk an zwei Zeitpunkten aufweist, um die aus der Temperaturdifferenz resultierenden Verformungsänderungen zu berechnen. Die Aufbringung der Einwirkungen erfolgt im Programmablauf im „Solutionmodus“.

Ergänzend wird darauf hingewiesen, dass die Messungen des Sickerwassers und des Sohlenwasserdrucks, die die Harzwasserwerke GmbH durchführen, belegt haben, dass die Messwerte gering und nahezu gleich bleibend sind. Auf Grundlage dieser Messergebnisse und der Erkenntnisse aus Kap. 2.2.2.2 entfallen für die Simulation des Verformungsverhaltens der Staumauer unter Betriebsbedingungen die Einwirkungen infolge Sohlenwasserdrucks.

Die FE-Berechnungen berücksichtigen also ausschließlich die Änderungen der Stauhöhe sowie der Umgebungstemperaturen des Wassers und der Luft.

5.2.6.1 Wasserdruck

Im Gegensatz zu den Temperatureinwirkungen können die Verformungskomponenten infolge der Wasserdruckdifferenz ohne Berücksichtigung der Lastgeschichte berechnet werden. Für das FE-Modell werden dabei zwei Fälle unterschieden, damit der hydrostatische Differenzdruck entsprechend seiner Wirkungsweise auf die Staumauer simuliert werden kann. Im ersten Fall, vgl. Abb. 5.16, nimmt die Stauhöhe zu, d.h. zum Zeitpunkt T_1 ist der Wasserstand im Staubecken geringer als zum nachfolgenden Zeitpunkt T_2 . Der zweite Fall, vgl. Abb. 5.17, beschreibt den fallenden Wasserstand im Staubecken, d. h. die Stauhöhe ist zum Zeitpunkt T_2 gegenüber dem Zeitpunkt T_1 gefallen und der Differenzdruck bewirkt eine Verformungsänderung der Staumauer zur Wasserseite.

Die linear veränderliche Wasserdruckdifferenz wird in ANSYS als Oberflächenbelastung auf die Wasserseite des FE-Modells angetragen.

Die hydrostatisch bedingten Verformungsänderungen der Staumauer sind vorrangig von den V-Moduln des Grobrüttelbetons und des Untergrundes abhängig, der genaue Einfluss der beiden

Größen wurde mit Sensitivitätsstudien untersucht. Die Ergebnisse werden in Kap. 6.5.3 ausführlich dargestellt und behandelt.

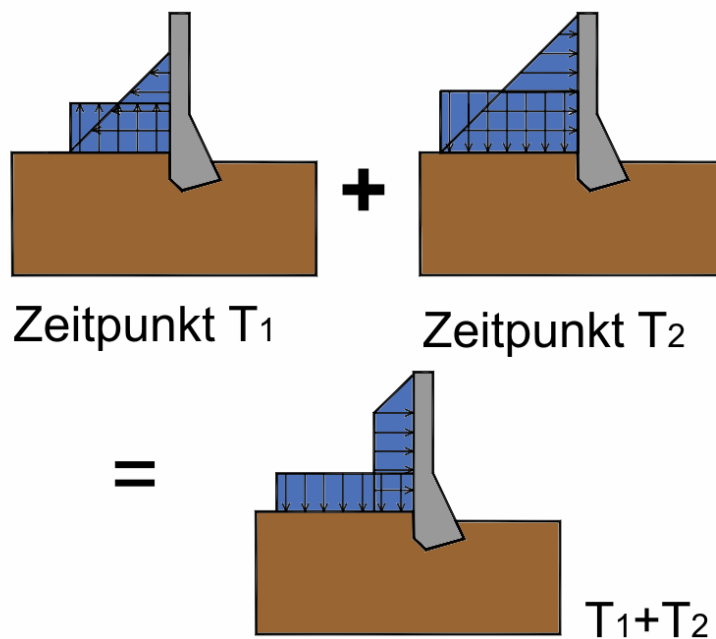


Abb. 5.16: Hydrostatischer Differenzwasserdruck bei steigendem Wasserstand

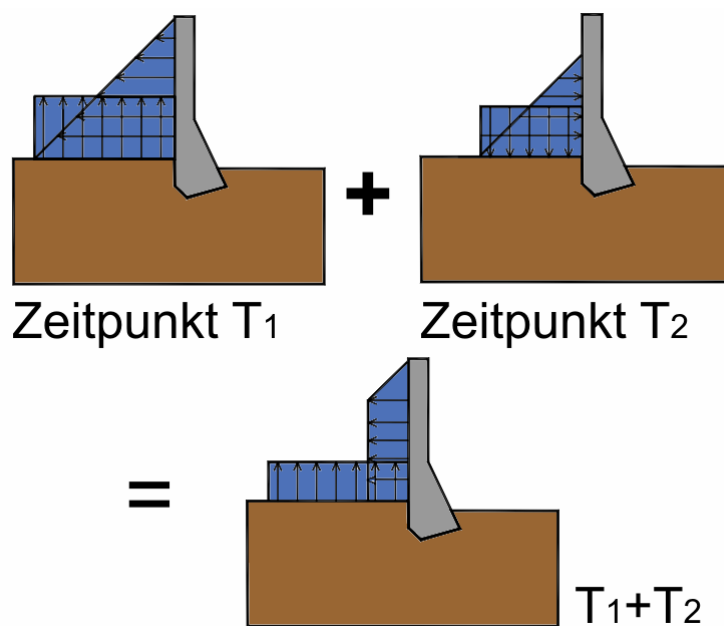


Abb. 5.17: Hydrostatischer Differenzwasserdruck bei fallendem Wasserstand

5.2.6.2 Temperaturänderungen

Die möglichst exakte Ermittlung der Einwirkungen ist Voraussetzung für ein gutes und plausibles Verformungsmodell. Es konnte jedoch nur die Stauhöhe mit hinreichender Genauigkeit ermittelt werden. Bei den Temperaturmessungen wurden nur die Umgebungstemperaturen durchgängig aufgezeichnet, während die Betontemperaturen erst ab Ende Oktober 2001, vgl.

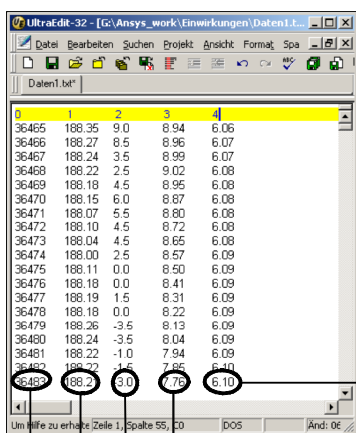
Kap. 4.1.1, in einem Profil in Mauermitte erfasst wurden. Sowohl die Umgebungs- als auch die gemessenen Mauertemperaturen sind nur an einigen diskreten Punkten bekannt.

Die temperaturbedingten Verformungsänderungen werden durch die Beton- und Untergrundtemperaturdifferenzen hervorgerufen, die wiederum aufgrund der Änderung der Umgebungstemperaturen entstehen. Der Weg zu den temperaturinduzierten Verformungen führt also über die Kenntnis des Temperaturfeldes in der Staumauer zu bestimmten Zeitpunkten. Wenn, wie im Fall der Okerstaumauer, keine bzw. unzureichende Messwerte der Bauwerkstemperaturen vorliegen, müssen die Temperaturfelder für jeden Zeitpunkt durch eine transiente Analyse ermittelt werden, vgl. Kap. 5.2.7.

Aus den ermittelten Bauwerks- und Untergrundtemperaturen werden bei der strukturmekanischen Analyse die Verformungsänderungen berechnet, die sich aus der Temperaturdifferenz zwischen zwei Zeitpunkten ergeben. Dazu werden mit Hilfe eines kleinen Visual-Basic-Programms die Differenztemperaturen für jeden Knoten aus den betrachteten beiden Zeitpunkten ermittelt und in einem ASCII-File gespeichert. Aus diesem ASCII-File werden während der strukturmekanischen Berechnung die Differenztemperaturen auf das Modell bzw. die Elementknoten in Form einer Volumenlast übertragen, vgl. Abb. 5.2 und Kap. 5.2.8.

5.2.6.3 Datenbank der gemessenen Einwirkungen

Die gemessenen Einwirkungen, die für die untersuchte Fragestellung relevant sind, wurden in einer Datenbank im ASCII-Format abgelegt. ANSYS entnimmt während der Berechnung die erforderlichen Daten aus dieser Datenbank. Die Datenbank enthält das Datum als fortlaufende Zahl, die sich auf den 01.01.1900 als Tag 1 bezieht, da das Datumsformat „TT.MM.JJJJ“ in ANSYS nicht verarbeitet werden kann. Als Einwirkungen sind die Stauhöhe, die Lufttemperatur sowie eine obere und untere Wassertemperatur enthalten, vgl. Abb. 5.20. Die Abb. 5.18 zeigt einen Ausschnitt der verwendeten ASCII-Datenbank. Die Einwirkungen, die in der Datenbank abgelegt sind, sind in Abb. 5.19 über die Zeit, für die die Untersuchungen durchgeführt werden, dargestellt.



1	2	3	4	5	6
36465	188.35	9.0	8.94	6.06	
36466	188.27	8.5	8.96	6.07	
36467	188.24	3.5	8.99	6.07	
36468	188.22	2.5	9.02	6.08	
36469	188.18	4.5	8.95	6.08	
36470	188.15	6.0	8.87	6.08	
36471	188.07	5.5	8.80	6.08	
36472	188.10	4.5	8.72	6.08	
36473	188.04	4.5	8.65	6.08	
36474	188.00	2.5	8.57	6.09	
36475	188.11	0.0	8.50	6.09	
36476	188.18	0.0	8.41	6.09	
36477	188.19	1.5	8.31	6.09	
36478	188.18	0.0	8.22	6.09	
36479	188.26	-3.5	8.13	6.09	
36480	188.24	-3.5	8.04	6.09	
36481	188.22	-1.0	7.94	6.09	
36482	188.22	0.0	7.86	6.10	

Labels and arrows pointing to columns:

- Wassertemperatur unten (points to column 3)
- Wassertemperatur oben (points to column 2)
- Lufttemperatur (points to column 4)
- Stauhöhe (points to column 5)
- Datum (points to column 1)

Abb. 5.18: Aufbau der Datenbank mit den Werten der verschiedenen Einwirkungen

Bei den Lufttemperaturen, die einen periodischen Jahresgang, vgl. Kap. 4.2, aufweisen, kann generell nicht ausgeschlossen werden, dass auf verschiedene Mauerbereiche, z.B. Kronen- oder Fußbereich, unterschiedliche Umgebungstemperaturen wirken. Der Einfluss der lokalen Lufttemperaturunterschiede ist gemäß einer durchgeführten Pilotstudie vernachlässigbar, vgl. Kap. 6.3, so dass der Ansatz einer Lufttemperatur ausreicht. Die Lufttemperaturdaten schwanken in dem betrachteten Zeitraum von zweieinhalb Jahren zwischen -16 °C und 29 °C .

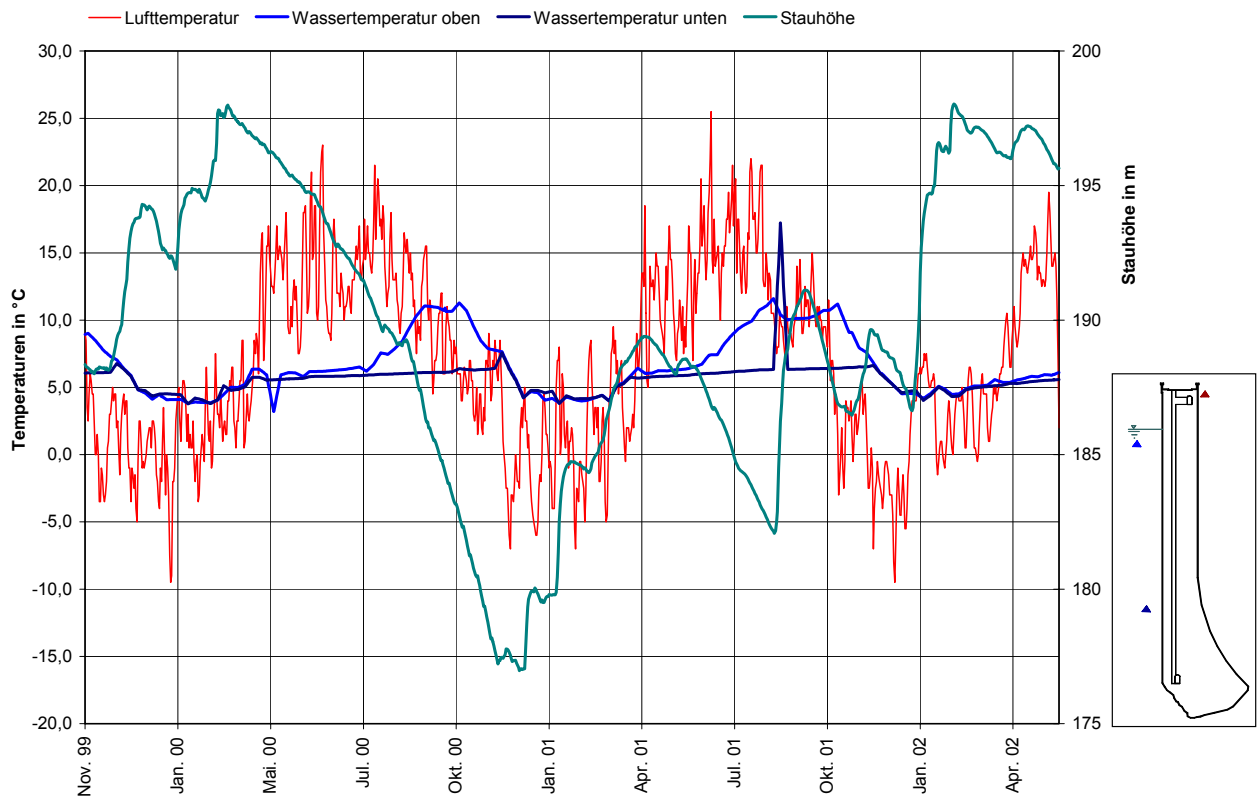


Abb. 5.19: Graphische Darstellung der gemessenen Einwirkungen

Bei den Wassertemperaturen wurden die Temperaturwerte der unteren drei Messstellen zu der unteren Wassertemperatur, die im Jahreszyklus zwischen 4 °C und 8 °C schwankt, gemittelt. Analog wurde mit der angegebenen oberen Wassertemperatur verfahren, dabei wurden die Messgeberausfälle bzw. die unplausiblen Temperaturwerte bei der Mittelwertbildung ausgeklammert, vgl. auch Kap. 6.3. Es werden Temperaturen zwischen 3 °C und 12 °C für die obere mittlere Wassertemperatur erreicht.

Die Wassertemperaturen wechseln im Jahresgang zwischen einer homogenen Temperaturverteilung und einem temperaturmäßig geschichteten Wasserkörper. Diese jahreszeitliche Schichtung der Wassertemperaturen muss bei der Ermittlung der Temperaturverteilung im Mauerinneren beachtet werden.

Im Winter stellt sich eine homogene Wassertemperatur von etwa 4 °C ein, während nach der Frühjahrszirkulation eine Erwärmung der oberflächennahen Schichten im Frühsommer erfolgt. Die Schichtausbildung prägt sich bis zum Spätsommer weiter aus, um dann im Verlauf des Herbstes wieder abzuklingen bis der homogene Zustand im Winter erreicht ist. Die Temperaturschwankungen an der Beckensohle sind gering, da auch in den Durchmischungszeiten die Wassertemperatur ungefähr im Bereich des Dichtemaximums liegt, das bei 4 °C auftritt. An der Wasseroberfläche schwanken die Wassertemperaturen im Jahresverlauf zwischen ungefähr

20°C und Werten unterhalb des Gefrierpunktes. Mit der Unterteilung der Wassertemperaturen in die beschriebenen zwei Bereiche wird der Schichtung des Wasserkörpers Rechnung getragen. Auf eine feinere Unterteilung wurde verzichtet, weil im Rahmen einer Vorstudie belegt werden konnte, dass sich die Berechnungsergebnisse mit einer feineren Temperaturdiskretisierung nicht wesentlich verändern. Zudem würde eine feinere Schichtung zu zusätzlichen, messtechnisch nicht abgesicherten Annahmen führen, da das gemessene Wassertemperaturprofil nur für verlässliche Temperaturangaben von zwei Schichten ausreicht.

Die Untergrundtemperatur schwankt dagegen nur innerhalb des schmalen Spektrums von 4°C bis 5°C, da die Temperatur des Wassers an der Beckensohle des Speichers mit ungefähr 4°C annähernd gleich bleibt und der Gründungsfels an der Luftseite größtenteils erdüberdeckt ist und eine starke Vegetation aufweist. Damit besteht für den Untergrund ein nahezu konstantes Temperaturfeld. Dementsprechend sind die auftretenden temperaturinduzierten Verformungen des Untergrundes vernachlässigbar, weil sie auf jeden Fall unterhalb der Messgenauigkeit liegen. Für die Berechnungen der Okerstaumauer wurde die Untergrundtemperatur konstant mit 5°C festgelegt.

Bei der transienten Temperaturfeldanalyse werden aus dieser Datenbank für jeden Tag die Umgebungstemperaturen abgefragt und unter Berücksichtigung der thermischen Belastungsgeschichte die Knotentemperaturen für den aktuellen Tag berechnet, vgl. Kap. 5.2.7.

Zu Beginn der anschließenden Strukturberechnung werden über die Datumsabfrage der beiden zu betrachtenden Zeitpunkte die Stauhöhe, bzw. daraus errechnet, die Wasserdruckdifferenz, vgl. Kap. 5.2.6.1, und die mit Hilfe des Visual-Basic-Programms, vgl. 5.2.6.2, ermittelten Differenztemperaturen der Knoten bestimmt. Auf Grundlage dieser Datenbasis erfolgt dann die strukturelle Berechnung der Verformungsänderungen, vgl. auch Abb. 5.2.

5.2.7 Transiente Temperaturfeldanalyse

5.2.7.1 Allgemeines

ANSYS ermöglicht zwei Arten von thermischen Analysen. Zum einen können stationäre und zum anderen transiente thermische Analysen durchgeführt werden. Mit der stationären Berechnung wird die Temperaturverteilung bzw. die Verteilung anderer thermischer Größen unter stationären Lastbedingungen ermittelt, das heißt die Effekte durch Wärmespeicherung oder zeitabhängige Lasten dürfen vernachlässigt werden. Es werden also die Temperaturen berechnet, die sich einstellen, wenn alle transienten Effekte abgeklungen sind. Die stationäre Analyseform kann, wie für die Okerstaumauer durchgeführt, als Vorläufer für eine transiente Temperaturfeldanalyse eingesetzt werden, um die Anfangstemperaturverteilung für die transiente Berechnung zu bestimmen.

Bei der Ermittlung der Temperaturverteilung im Bauwerk handelt es sich um den Anteil der verformungsrelevanten Prozesse, der bei massiven Bauwerken wie Staumauern instationär betrachtet werden muss. Mit der transienten Temperaturfeldberechnung wird die Verteilung der Temperatur bzw. anderer thermischer Größen unter Berücksichtigung der Wärmespeicherung des Bauteils und unter Einwirkung von zeitabhängigen Lastbedingungen ermittelt. Es handelt sich also um Wärmeausgleichsvorgänge, bei denen die Wärmekapazität des Bauteils zur Ver-

zögerung des Temperatenausgleichs führt. Daher muss die im Bauteil gespeicherte Energie bei der Berechnung in der Energie- oder Wärmebilanz berücksichtigt werden. In der Vorgehensweise liegt der wesentliche Unterschied zwischen der stationären und der transienten Berechnung darin, dass bei der transienten Analyse die Einwirkungen eine Funktion der Zeit darstellen und somit eine Zeitintegration ablaufen muss. Die Verteilung der betrachteten thermischen Größe wird, aufbauend auf den Ergebnissen des vorher ausgeführten Berechnungsschritts, für die Bedingungen berechnet, die ein Zeitintervall später vorliegen. Dementsprechend ist der Last-Zeitverlauf in sinnvolle Lastschritte zu zerlegen. Ein Lastschritt umfasst die Angabe des Zeitintervalls und die Definition der zugehörigen Einwirkung, die auf das Bauteil wirkt. Der erste Schritt beim Aufbringen der transienten Einwirkungen ist die Festlegung der Anfangsbedingungen. Diese sind entweder bekannt und werden den Knoten zugeordnet oder sie werden durch eine Berechnung der stationären Anfangsverteilung bestimmt.

In ANSYS können grundsätzlich alle drei Formen der Wärmeübertragung – Wärmeleitung, Wärmeübergang (Konvektion) und Wärmestrahlung – numerisch simuliert werden. Für die Untersuchung der Okerstaumauer wurden die Einflüsse aus Wärmeleitung und Konvektion in dem Berechnungsmodell berücksichtigt. Die Wärmestrahlung wurde vernachlässigt, da sie ausschließlich die oberflächennahen Bereiche der Mauer beeinflusst und entsprechend schnell abklingt. Zudem liegen keinerlei Messungen vor, um die Effekte der Wärmestrahlung realistisch zu simulieren. Beim Wärmeübergang erfolgt der Energietransport über einen Materialtransport. Flüssigkeiten oder Gase, allgemein Fluide genannt, nehmen Energie auf und bewegen sich vom Ort höherer Energie zu Orten niedrigerer Energie bzw. umgekehrt und geben dort Energie ab bzw. nehmen sie auf. Es treffen sozusagen zwei Grenzschichten aufeinander, zwischen denen sich eine Übergangsschicht ausbildet. Der Wärmeübergang basiert auf folgender Gleichung

$$\alpha \cdot A \cdot (T_F - T_W) = Q \quad [5.11]$$

mit

α	Wärmeübergangskoeffizient
A	Fläche
T_F	Temperatur im Fluid außerhalb der Grenzschicht
T_W	Oberflächentemperatur
Q	Wärmestrom.

In der FEM-Berechnung wird der Effekt der Konvektion am Rand des Modells als Randbedingung angegeben.

5.2.7.2 Initialzustand

Die transiente Temperaturfeldanalyse muss von einer bekannten Temperaturverteilung ausgehend beginnen. Dieser Zustand ist im Fall der Okerstaumauer zunächst unbekannt, da das Temperaturfeld der massiven Mauer ständigen Änderungen unterworfen ist. Im Verlauf eines Jahres stellt sich zu keiner Zeit ein stationärer Zustand ein, der als Anfangszustand der Berech-

nung genutzt werden könnte. Daher muss ein Ausgangstemperaturfeld angenommen werden, das dem tatsächlichen Temperaturfeld zum Berechnungsbeginn möglichst genau entspricht und stetig ist. Die Qualität des verwendeten Initialzustandes ist für die Güte der Berechnungsergebnisse entscheidend, denn aufgrund des instationären Prozesses der Temperaturanalyse basiert die Lösung von jedem Zeitschritt auf dem berechneten Temperaturfeld des vorhergehenden Zeitschritts. Damit steigt die Ergebnisgüte der transienten Berechnung mit der Qualität des erzeugten Anfangszustandes. Für die Ermittlung dieses Initialzustandes gibt es verschiedene Vorgehensweisen.

Im Jahresverlauf wirkt auf das Modell eine periodisch schwankende Temperaturbelastung. Das Temperaturfeld kann daher nach einem bestimmten Zeitraum ausgehend von einer beliebigen Ausgangstemperaturverteilung, in dem die Umgebungstemperaturen auf das Modell wirken, generiert werden. Je länger die Temperaturbelastung auf das Modell aufgebracht wird, desto mehr konvergiert die berechnete Temperaturverteilung des Bauwerks gegen die tatsächliche Verteilung. Dieser Einschwingprozess erfordert in der Regel einen Simulationszeitraum von mehreren Jahren. Die beschriebene Vorgehensweise wurde für eine zweidimensionale Untersuchung eines Gewichtsmauerquerschnitts in [167] angewendet.

Wenn die Betontemperatur bereits zum Beginn der Berechnung an ausreichend vielen Positionen gemessen worden wäre, hätten diese auf das Modell übertragen werden können. Leider liegen zum Zeitpunkt des Berechnungsbeginns keine Betontemperaturen vor. Man kann jedoch davon ausgehen, dass sich zum selben Monat eines Jahres ähnliche Temperaturfelder in der Stauwand einstellen. Diese Annahme wird durch den periodischen Verlauf der Umgebungstemperaturen unterstützt. Daher wurden die Betontemperaturmessungen, die seit Ende Oktober 2001 durchgeführt wurden, zur Erstellung eines Initialzustandes verwendet. Mit Hilfe der gemessenen Betontemperaturen vom 31. Oktober 2001 wurde mit einer stationären Temperaturfeldberechnung ein Ausgangstemperaturfeld erzeugt und für die nachfolgende transiente Berechnung extrahiert, vgl. Batch-File „Initialmauertemperatur1“ in der Anlage. Die Gleichung für stationäre Temperaturfeldprobleme ist der Gleichung [5.4] bzw. [5.5] und den Erläuterungen aus Kap. 5.1.1.2 zu entnehmen. Aus der Initialtemperaturverteilung werden im Postprozessor die berechneten Knotentemperaturen extrahiert und in einer ASCII-Datei abgespeichert. So kann der ermittelte Initialzustand, dessen Temperaturverteilung dem tatsächlichen Temperaturfeld zum Berechnungsbeginn ungefähr entspricht, für die transiente Berechnung als Randbedingung auf das Modell aufgebracht werden. Der Startpunkt der transienten Analyse ist der 1. November 1999.

Vorteilhaft an dieser Vorgehensweise ist auch die damit einhergehende Flexibilität. Auf Basis des erzeugten Initialtemperaturfeldes wird jedem Knoten zu Beginn der transienten Berechnung eine Anfangstemperatur zugewiesen. Für den ersten Lastschritt hat dieses Temperaturfeld damit die gleiche Funktion wie beispielsweise das Ergebnis des siebten Lastschritts für den achten. Wenn das entsprechende Temperaturfeld des vorhergehenden Lastschritts vorliegt, kann die Berechnung von jedem beliebigen Zeitpunkt aus erneut gestartet werden.

5.2.7.3 Thermische Belastung

Der täglich erfasste Mittelwert der Lufttemperatur wird für jeden Tag als konstanter Wert an dem gesamten luftbenetzten Bereich der Staumauer als Oberflächenlast angetragen, vgl. Abb. 5.20. Die Lastschrittweite für die transiente Temperaturfeldberechnung beträgt also 1 Tag bzw. 86400 Sekunden.

Die Wassertemperaturen werden in einen oberen und einen unteren Bereich unterteilt, vgl. Kap. 5.2.6.3. Die geometrische Zuordnung der beiden Wassertemperaturbereiche zu dem Staumauermodell zeigt Abb. 5.20. Aus der Datenbank wird die Stauhöhe des betrachteten Zeitpunktes abgefragt. An die untere wasserbenetzte Bauwerksoberfläche wird die untere mittlere Wassertemperatur als Oberflächenlast angetragen und analog wird die obere mittlere Wassertemperatur als Oberflächenlast auf die obere wasserbenetzte Hälfte aufgebracht.

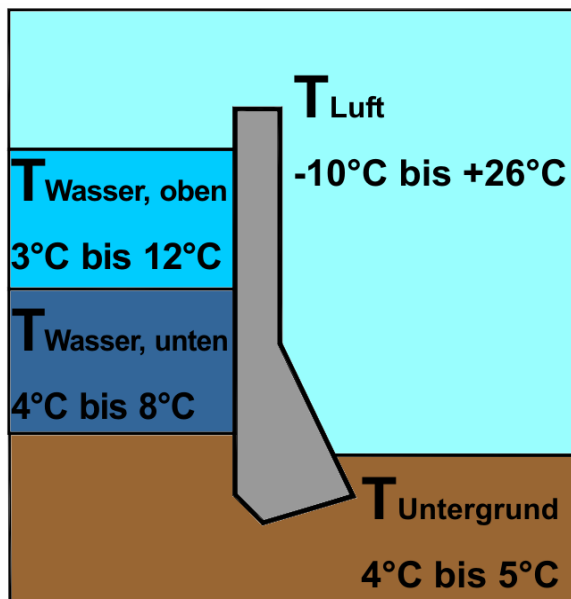


Abb. 5.20: Bereiche der Umgebungstemperaturen

5.2.7.4 Ablauf der thermischen Berechnung

Anhand des ausführlich dokumentierten Batch-Files „Transiente Temp.-Analyse1“ in der Anlage kann die Modellgenerierung und –belastung nachvollzogen werden.

Zu Beginn des transienten Berechnungslaufs wird das vom Anwender gewünschte Anfangs- und Enddatum der transienten Analyse abgefragt. Dieses erfolgt, genau wie die Geometrieerstellung, die Element- und Materialdatenzuweisung sowie die Diskretisierung, im Preprozessor. Im Lösungsabschnitt werden die Randbedingungen und die Einwirkungen aufgebracht. Als Randbedingung für die transiente Analyse wird das erzeugte Ausgangstemperaturfeld eingelesen. Als Einwirkungen werden, für die Temperaturfeldberechnung in Abhängigkeit vom Zeitpunkt und damit von der Stauhöhe, die Umgebungstemperaturen für den luft- und wasserbenetzten Bereich aufgebracht. Wichtig ist, dass für den angegebenen Zeitraum die Einwirkungen in der Datenbank, vgl. Kap. 5.2.6.3, enthalten sind. Für die transiente Berechnung muss das exakte Ende eines Lastschritts angegeben werden. Es soll täglich ein Lastschritt berechnet werden, das heißt das Zeitintervall für einen Lastschritt beträgt bei den verwendeten SI-

Einheiten, vgl. Kap. 5.1.3.3, 86400 Sekunden. Im Postprozessor erfolgt dann die Ergebnisbearbeitung und Sicherung der gewünschten Daten. Für die transiente Temperaturfeldanalyse werden zwei Formen der Ergebnisbearbeitung durchgeführt. Für die Parameterstudie der Wärmeleitfähigkeit und für spätere Ergebnisdarstellungen werden von jedem Lastschritt die Temperaturen von den Knoten, die die Position eines Betontemperatursensors haben, in einer ASCII-Datei gespeichert. In dem automatisch generierten Dateinamen ist das Datum des Lastschritts enthalten. Die Zuordnung der Knotennummer zur Betontemperaturmessstelle zeigt Tab. 5.6. Das Netz konnte so generiert werden, dass für jede Position der Betontemperatursensoren ein Knoten erzeugt wurde. Nur ein Temperatursensor liegt genau zwischen zwei benachbarten Knoten, daher wird für den Vergleich mit den gemessenen Betontemperaturen der Mittelwert der beiden Knotentemperaturen gebildet. Die Anordnung der Temperatursensoren in der Stau-mauer zeigt Abb. 4.13.

Die Größe der Wärmeleitfähigkeit wurde mit Hilfe einer Parameterstudie optimiert, vgl. Kap. 6.4.1. Unter Verwendung einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 3,5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ stimmen ab dem Rechnungsbeginn der transienten Analyse die für jeden Tag berechneten Temperaturfelder sehr gut mit den gemessenen Betontemperaturen überein. So konnte der Zeitpunkt für den Berechnungsbeginn der nachfolgenden Strukturberechnung auf den 1. Januar 2000 festgesetzt werden.

Betontemperaturmessstelle	Zugehörige Knoten-Nr.
BT1	10083
BT2	9644
BT3	9665
BT4	9662 bzw. 9663
BT5	9482
BT6	9479
BT7	9471

Tab. 5.6: Zuordnung der Knotennummern zu den Betontemperatursensoren

Für die nachfolgende Strukturanalyse werden alle Knotentemperaturen benötigt, um die Differenztemperatur aus zwei beliebigen Zeitpunkten zu ermitteln und die daraus resultierenden Verformungsänderungen zu berechnen. Die Knotentemperaturen von jedem berechneten Lastschritt werden in einer ASCII-Datei gespeichert, die als Dateinamen das Datum des entsprechenden Tages zugeteilt bekommt.

5.2.8 Strukturanalyse zur Verformungsberechnung

In dem Batch-File „Strukturanalyse-DW+DT1“ in der Anlage ist die Modellgenerierung und –belastung nachvollziehbar dokumentiert.

Das Preprozessing ist größtenteils identisch mit dem Preprozessing der transienten Temperaturfeldberechnung, denn die Geometrie und die Diskretisierung gelten einheitlich für beide Berechnungstypen. Nur bei identischer Elementierung und damit auch bei identischer Lage der

Knoten im Modell ist es möglich, die berechneten Knotentemperaturen für die nachfolgende Strukturberechnung als Einwirkung aufzubringen (Temperatur-Struktur-Kopplung). Unterschiede ergeben sich beim Elementtyp bei gleich bleibender Elementgeometrie für die Freiheitsgrade, vgl. Kap. 5.1.2. Bei der Temperaturfeldanalyse sind die Freiheitsgrade die Knotentemperaturen, während es bei der Strukturanalyse die Knotenverschiebungen sind. Weitere Unterschiede ergeben sich in den für die Berechnung benötigten Materialkennwerten. Für die Untersuchungen an der Okerstaumauer wurden alle erforderlichen Materialkennwerte in einem Materialmacro abgelegt, das in beiden Berechnungstypen einheitlich aufgerufen wird. In Abhängigkeit von der ausgeführten Berechnung wird auf die benötigten Materialkennwerte zurückgegriffen. Im Preprozessing werden zudem die beiden zu betrachtenden Zeitpunkte über die Datumsangabe vom Anwender abgefragt. Damit können die daraus resultierenden Wasserdruck- und Temperaturdifferenzen ermittelt werden, die dann im „Solutionmodus“ auf das Modell aufgebracht werden, vgl. Abb. 5.2. In der gleichen Analysephase werden die Lagerungsbedingungen als Randbedingungen angetragen. Die Aufstandsfläche sowie die luft- und wasserseitige Felsberandung des Modells ist starr gelagert, die Knoten der Flächen werden also in x-, y- und z-Richtung gehalten. Die Widerlagerberandung ist nur tangential, also in y-Richtung, gelagert. Mit diesen Lagerungsbedingungen wird das reale Bauwerksverhalten entsprechend seines Tragverhaltens approximiert.

Im Postprozessing erfolgt die Auswertung der berechneten Verformungsänderungen. Ziel der Auswertung ist ein Vergleich der gemessenen mit den berechneten Verformungsänderungen. Daher werden mehrere Pfade in das Modell gelegt, anhand derer die Auswertung erfolgt. Die Pfade liegen an den Stellen, an denen auch die Messungen durchgeführt wurden, also schwerpunktmäßig in Mauermitte in der Fuge 5/6 und der Fuge 6/7 sowie in den Fugen 3/4 und 9/10, vgl. Abb. 4.14. Entlang dieser Pfade werden die Verschiebungsverläufe an der wasserseitigen Bauwerkskante über die gesamte Mauerhöhe ausgegeben und in einer entsprechend benannten ASCII-Datei abgespeichert. Damit können, wie schon für die Temperaturfeldberechnung, die nachfolgende Ergebnisbetrachtung und der Vergleich mit den Messungen in MS-Excel erfolgen.

6 Validierung des Analysemodells mit Hilfe der Messwerte

6.1 Elementtyp und Netzgeometrie

Die Optimierung und Festlegung des Elementtyps und der Netzgeometrie erfolgte vor den Sensitivitätsstudien der einzelnen Materialkennwerte, um die Einflüsse der variierten Parameter am endgültig vernetzten Modell zu untersuchen. Als Einwirkung wurde für die Studie nur eine hydrostatische Wasserdruckdifferenz aufgebracht. Analysiert wurden der Einfluss auf die Berechnungsergebnisse bei Verwendung der Volumenelemente mit acht (Solid 45) und mit 20 Knoten (Solid 95), vgl. Kap. 5.2.5 und der Einfluss der Netzdichte. Über die Netzgeometrie wird die Elementgröße gesteuert. Im Modell gibt es feiner und gröber diskretisierte Bereiche. Der Grund für die unterschiedliche Netzdichte innerhalb des Modells liegt in der Geometrie des Bauwerks und der Relevanz der einzelnen Mauerbereiche für die Berechnungsergebnisse, vgl. Kap. 5.2.5, Abb. 5.13 und 5.14. Für die Untersuchung der Netzgeometrie wurde die Netzgröße von einem sehr groben (Netz 1) bis zu einem sehr feinen Netz (Netz 5) gestaffelt. Das Netz 1 hatte minimale Elementkantenlängen von 4 bis 5 m bzw. maximale Kantenlängen von etwa 35 m. Das Netz 1 wurde anwendergesteuert bis zu minimalen Kantenlängen von 10 bis 20 cm bzw. maximalen Kantenlängen von 2 m (Netz 5) verfeinert. Die Ergebnisse der Parameterstudie sind in Abb. 6.1 dargestellt. Basierend auf dieser Parameterstudie wurde das Netz 2 (gelb hinterlegt) für die Verformungsuntersuchung der Staumauer verwendet, daher sind alle Angaben in Abb. 6.1 skaliert und beziehen sich auf die Berechnung mit dem Elementtyp Solid 45 und dem Netz 2, vgl. Abb. 5.13 und 5.14. Das verwendete Netz 2 hat minimale Kantenlängen kleiner 1 m bis hin zu maximalen Kantenlängen von 10 m. Gegenüber dem Netz 2 ist bei feinerer Diskretisierung eine Änderung der Berechnungsergebnisse kleiner 3% festzustellen, der Berechnungsaufwand, d. h. Anzahl der Knoten und die Rechenzeit, steigen dagegen um den Faktor 3 bis 4 an. Die Verwendung des beschriebenen Netzes 2 erweist sich in der Studie unterschiedlicher Elementgrößen als sinnvoll im Verhältnis der Qualität der Berechnungsergebnisse zur Rechenzeit. Eine weitere Verfeinerung der Elementgröße zeigt kaum Abweichungen der Ergebnisse, aber einen deutlich höheren Rechenaufwand. Der Vergleich der Netze 1 und 2 zeigt bei den Berechnungsergebnissen eine Abweichung von etwa 10%, so dass das Netz 1 als zu grob eingestuft wurde. Auch die Verwendung des Elementtyps Solid 95 wird bei gleichem Netz im Verhältnis zum Elementtyp Solid 45 nicht als sinnvoll erachtet.

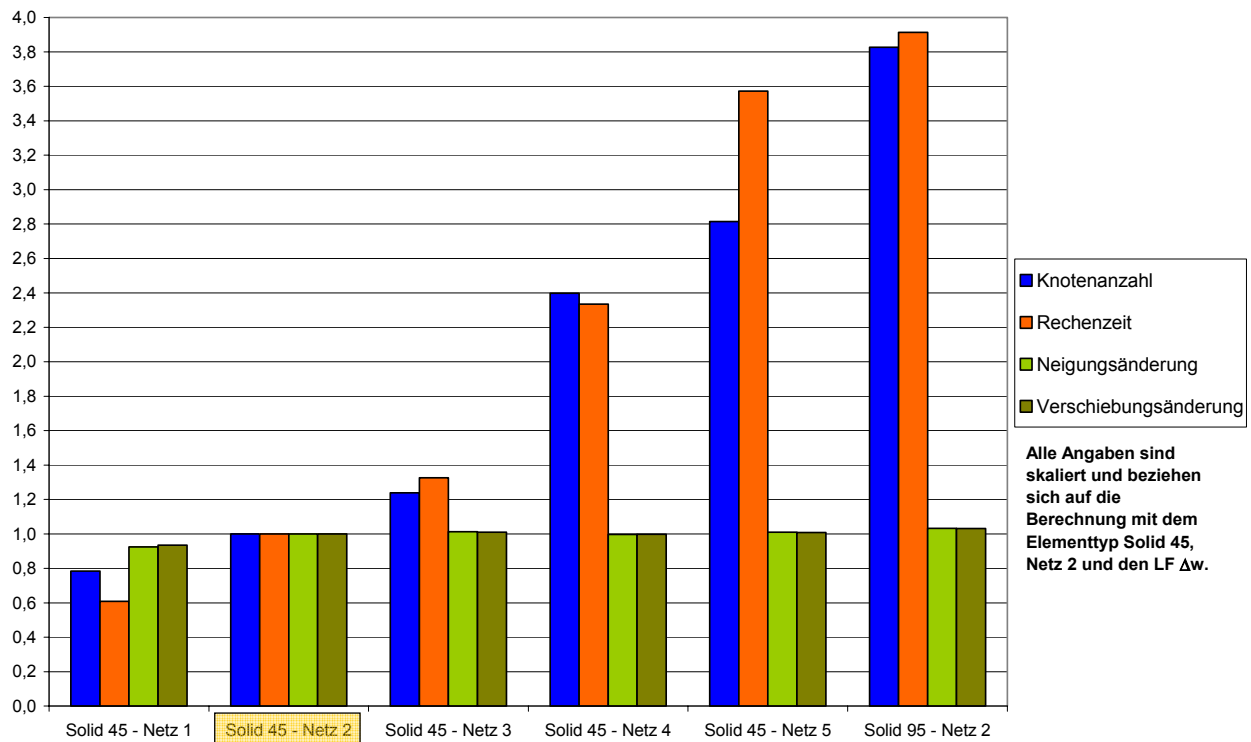


Abb. 6.1: Ergebnisse FEM-Studie Elementtyp und Netzgeometrie

6.2 Einfluss der Stauhöhe auf das Verformungsverhalten

Im Vorfeld der eigentlichen Parameterstudien wurde an dem in Kap. 5 vorgestellten Modell der Einfluss der Stauhöhe auf das Verformungsverhalten der kombinierten Bogen-Gewichtsstaumauer untersucht. Dazu wurde von dem Prinzip der Modellierung von Einwirkungsdifferenzen abgewichen und unter Beachtung des Eigengewichts der Staumauer der hydrostatische Wasserdruck, der sich aus der Stauhöhe Z_w ergibt, als Einwirkung auf das Modell aufgebracht. Die Einflüsse aus Temperaturänderungen wurden für diese Studie gezielt vernachlässigt. Untersucht wurden die Verformungen infolge von Stauhöhen zwischen dem maximalen Stauziel und sehr geringem Wasserstand im Staubecken, vgl. Abb. 6.2. Mit dieser Studie konnte die „aussteifende“ Wirkung der Bogenmauer und damit die Bedeutung der Fugenmodellierung belegt werden. Fällt der Wasserstand unter die Höhe $Z_w=187,00$ m, das entspricht der Oberkante der Bogenstaumauer, dann wird die Verformung der gesamten Staumauer deutlich geringer, vgl. Abb. 6.2.

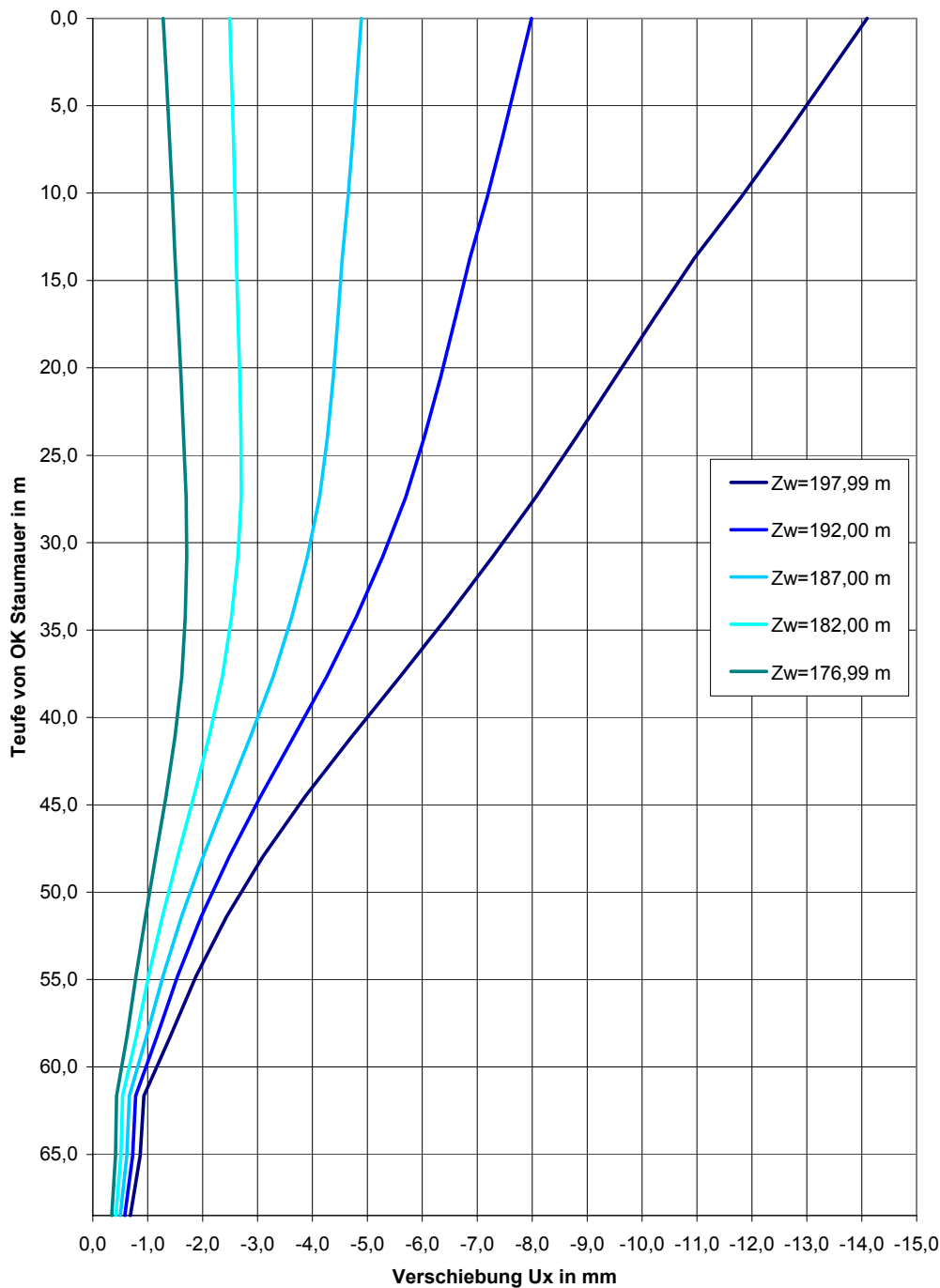


Abb. 6.2: Einfluss der Stauhöhe auf die horizontalen Verschiebungen u_x in Mauermitte der kombinierten Bogen-Gewichtsstaumauer

6.3 Einfluss der Umgebungstemperaturen

Im Rahmen einer Pilotstudie wurde an einem vereinfachten 3D-Modell der Einfluss der unterschiedlichen Temperaturänderungen auf die Verformungen bzw. Verformungsänderungen der Staumauer untersucht. Die Studie belegte, dass eine Unterteilung von Bereichen mit unterschiedlichen Lufttemperaturen, beispielsweise an der Krone und am Mauerfuß, Auswirkungen auf die Verformungsänderungen haben, die in der Größenordnung der Messgenauigkeit der

Messgeräte liegen. Damit ist eine Unterteilung in verschiedene Lufttemperaturbereiche nicht sinnvoll, zumal nur eine Lufttemperatur gemessen wurde. Des Weiteren erwiesen die Analyseergebnisse eindeutig, dass für eine sinnvolle Simulation der realen Umweltbedingungen eine Schichtung der Wassertemperaturen bzw. der daraus resultierenden Differenztemperaturen erforderlich ist. Die Parameterstudie belegte, dass der Ansatz von zwei Schichten für die Wassertemperaturdifferenz ausreichend ist, vgl. Kap. 5.2.6.3 und 5.2.7.3 sowie Abb. 5.19. Eine feinere Schichtung der Temperaturdifferenzen führt lediglich zu einer geringen Ergebnisänderung, der jedoch auf Seite der Differenztemperaturaufbringung nur Annahmen und keine verwendbaren Messgrößen gegenüberstehen.

6.4 Transiente Temperaturfeldanalyse

6.4.1 Parameterstudie der Wärmeleitfähigkeit unter Einbeziehung der gemessenen Betontemperaturen

Die Haupteinflussfaktoren bei der Ermittlung der Temperaturverteilung im Bauwerk mit Hilfe der transienten Temperaturfeldberechnung sind das Initialtemperaturfeld, vgl. Kap. 5.2.7.2, die Wärmeleitfähigkeit, die Wärmekapazität und die Wärmeübergangskoeffizienten. Das Initialtemperaturfeld wurde bereits mit Hilfe der vorhandenen Messdaten möglichst genau an den realen Zustand angenähert. Die Wärmeübergangskoeffizienten wurden auf Basis von Fachliteratur, vgl. Kap. 5.2.4.2, festgelegt. Die Wärmekapazität wurde mit dem Wert von $1050 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ angesetzt, da in die Gleichung der Wärmebilanz der Quotient aus Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit linear eingeht. Somit reicht es aus, einen der beiden Parameter variabel zu halten und durch eine Parameterstudie zu bestimmen. Dementsprechend wird eine Sensitivitätsstudie der Wärmeleitfähigkeit durchgeführt, um das Berechnungsmodell realitätsnah zu optimieren. Dabei können der Wärmeleitfähigkeit durch die Parameterstudie durchaus unrealistische Werte zugewiesen werden, da indirekt die Schwankungsbreite der Wärmekapazität mit enthalten ist. Die Wärmeleitfähigkeit wurde im Rahmen der Parameterstudie zwischen den Werten von $2,5$ bis $4,0 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ variiert. Für die Beurteilung wird die aus den verschiedenen Wärmeleitfähigkeitswerten berechnete Temperaturverteilung mit der tatsächlich gemessenen Betontemperatur verglichen. Als Betrachtungszeitraum dient die Zeit vom 29.10.2001 bis zum 16.12.2001. Verglichen werden kann nur an den Positionen der Temperaturoberflächen im Querschnitt in Mauermitte, vgl. Abb. 4.13. Die Abb. 6.3 bis Abb. 6.7 zeigen die Ergebnisse der Parameterstudie. Dargestellt sind die gemessenen und die in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit berechneten Betontemperaturen über die Zeit. Beim Vergleich der Betontemperaturen zeigen sich für die Position BT1 und BT2, Abb. 6.3, nur sehr geringe Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeitswerten. Bei Betrachtung der Messstellen BT3 bis BT7, vgl. Abb. 6.4 bis Abb. 6.7, zeigen sich die Unterschiede in den berechneten Betontemperaturen deutlicher, insgesamt treten jedoch bei den berechneten Betontemperaturen nur Abweichungen von 3°C bis 4°C auf. Diese Ergebnisse belegen, dass der Einfluss der Wärmeleitfähigkeit auf die Betontemperaturen im Vergleich zu der Bedeutung des Initialzustandes geringer ist, wenn realistische Werte für die Wärmeleitfähigkeit verwendet werden. Damit sind auch Streuungen bei der Wärmeleitfähigkeit, beispielsweise durch feuchte Mauerbereiche oder natürliche Schwankungen in den Materialkennwerten vernachlässigbar. Bezogen auf die gemessenen Betontemperaturen zeigt der Ver-

lauf bei einer Wärmeleitfähigkeit von $2,5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ die größten Abweichungen. Die berechneten Betontemperaturen infolge der Wärmeleitfähigkeiten von $3,5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ und $4,0 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ zeigen im Vergleich mit den Messungen eine ähnliche Qualität. Die Berechnungsergebnisse infolge der Wärmeleitfähigkeit von $3,5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ liegen maximal etwa 1°C unter den gemessenen Werten während sich infolge der Wärmeleitfähigkeit von $4,0 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ein Temperaturverlauf bis maximal $1,5^\circ\text{C}$ über dem gemessenen Verlauf ergibt. Insgesamt ist der Temperaturverlauf bei einer Wärmeleitfähigkeit von $3,5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ qualitativ besser, weil sich ein Temperaturverlauf einstellt, der weitgehend parallel zu den Messwerten verläuft. Die geringen und nahezu gleichmäßigen Abweichungen von den Messwerten, die selbst mit Messungenauigkeiten behaftet sind, belegen die Güte des erstellten Initialtemperaturfelds und der verwendeten Wärmeleitfähigkeit.

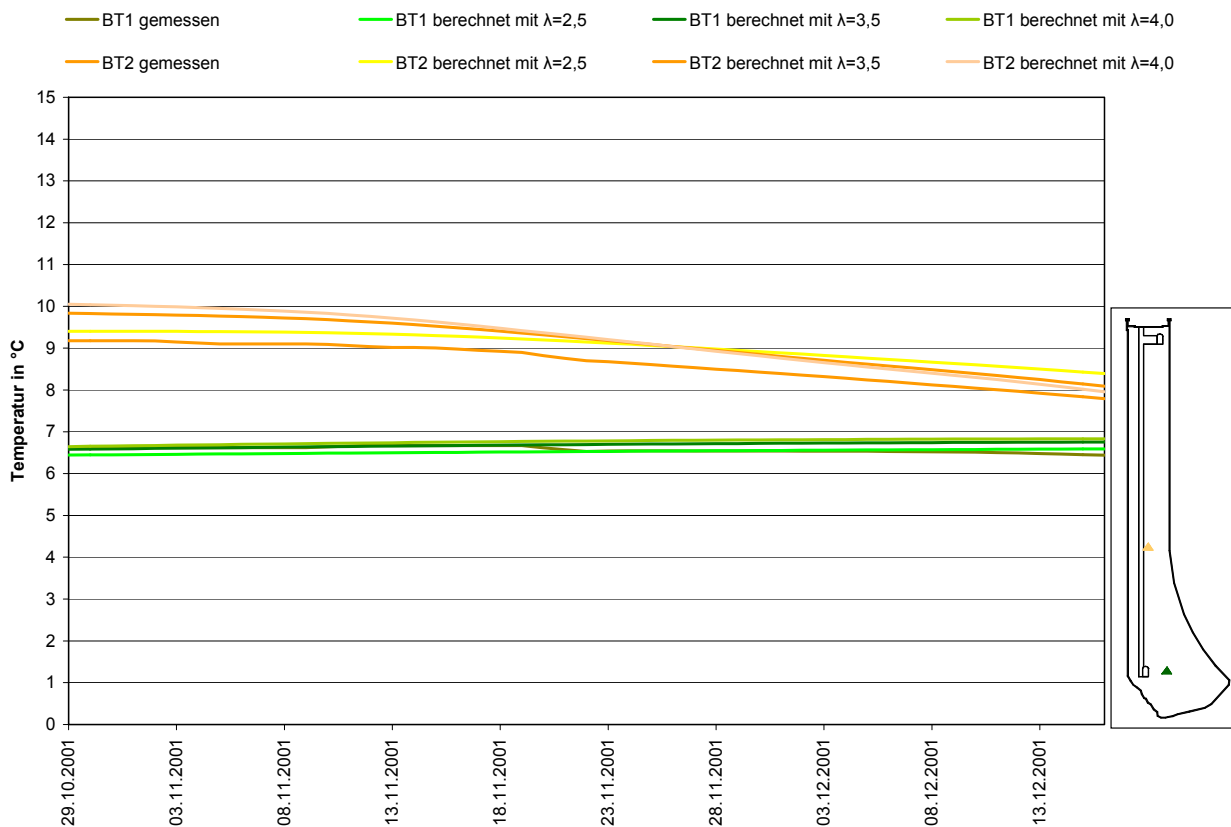


Abb. 6.3: Vergleich gemessener und berechneter Betontemperaturen an den Messstellen BT1 und BT2

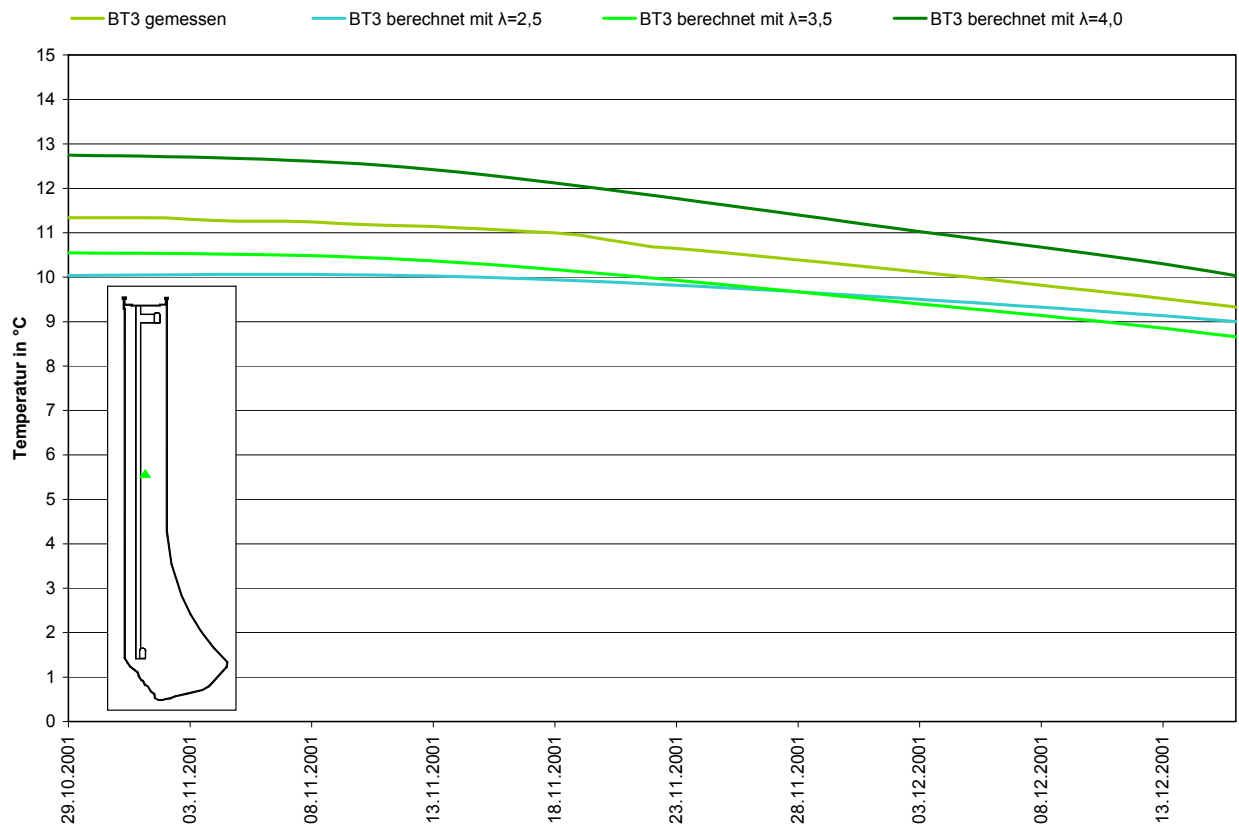


Abb. 6.4: Vergleich gemessener und berechneter Betontemperaturen an der Messstelle BT3

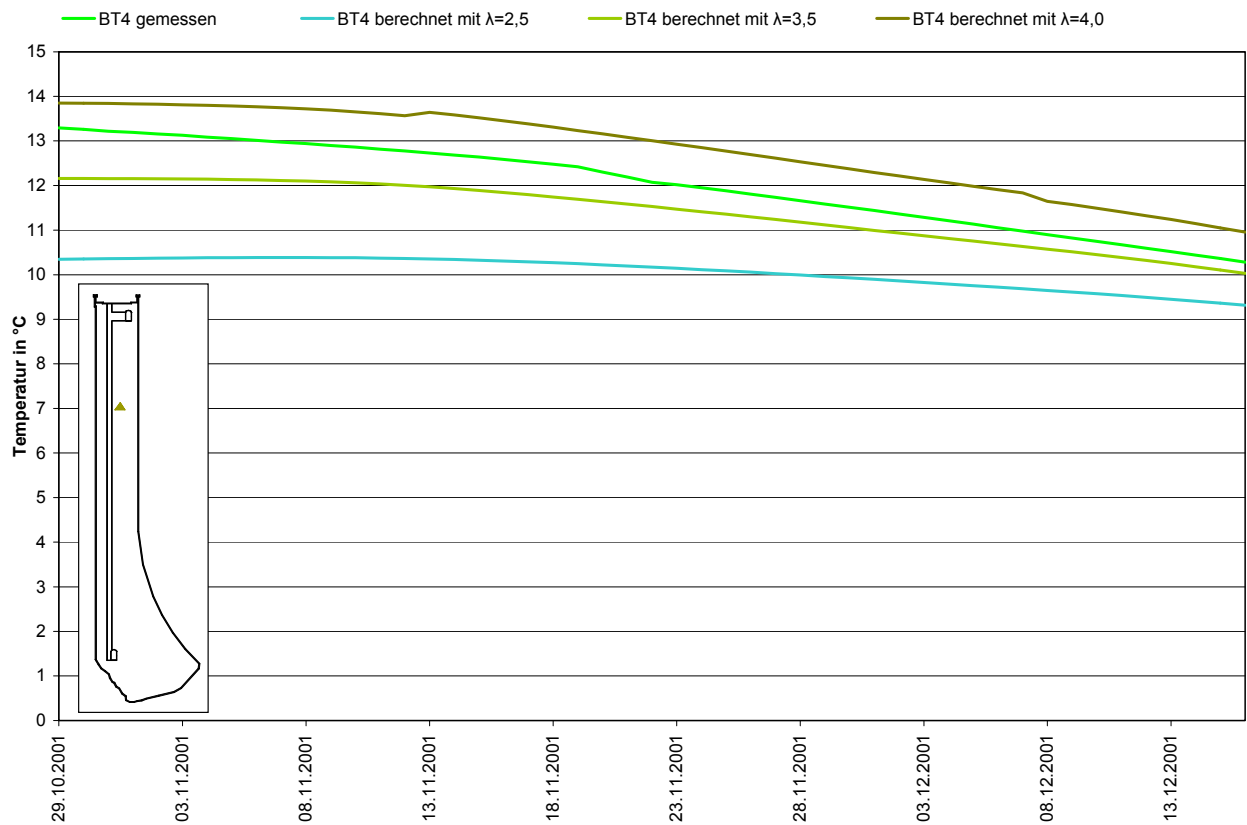


Abb. 6.5: Vergleich gemessener und berechneter Betontemperaturen an der Messstelle BT4

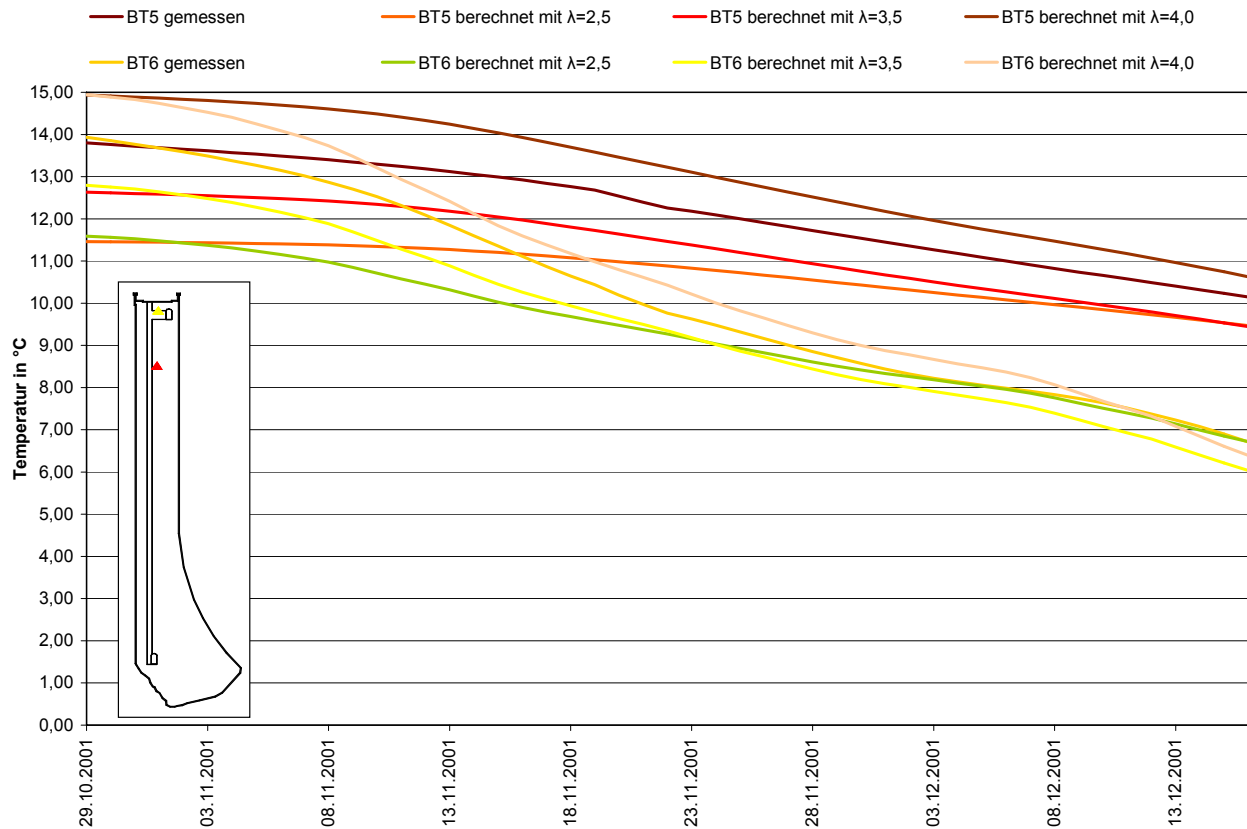


Abb. 6.6: Vergleich gemessener und berechneter Betontemperaturen an den Messstellen BT5 und BT6

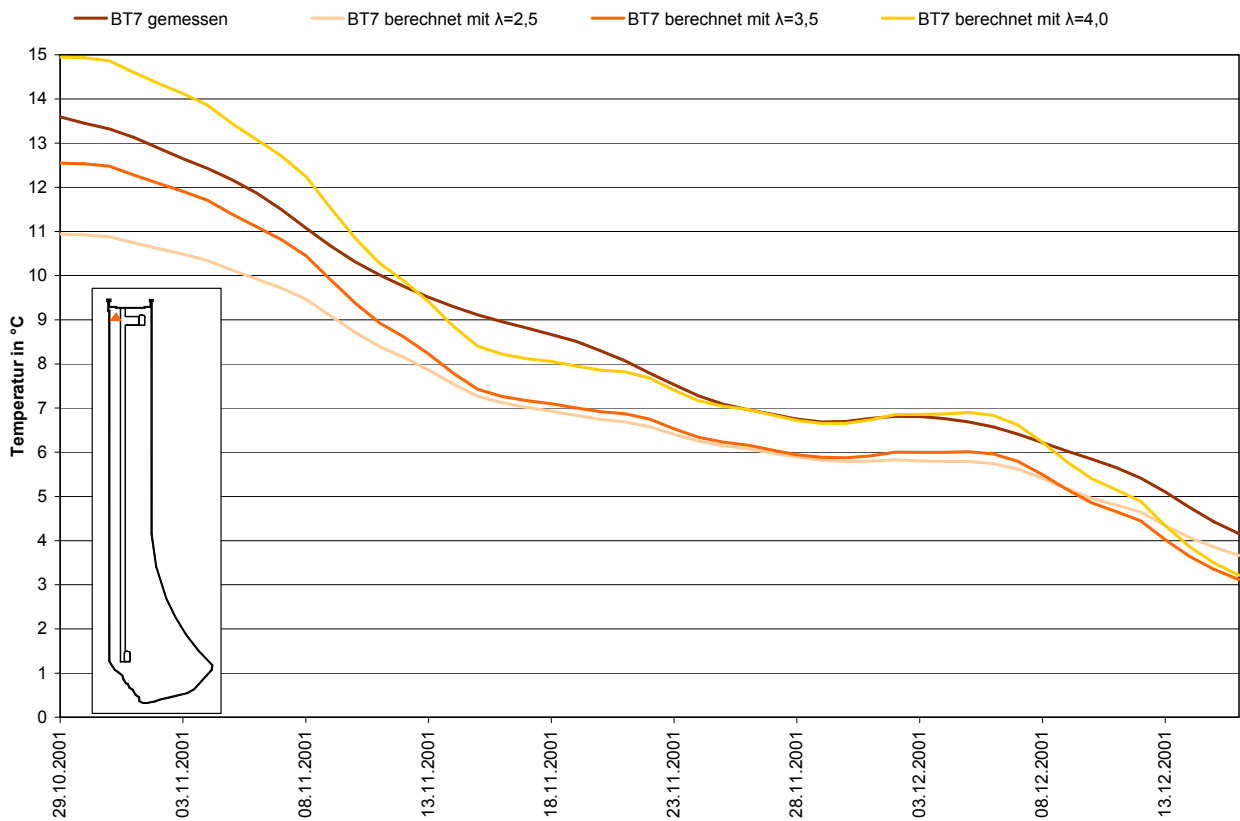


Abb. 6.7: Vergleich gemessener und berechneter Betontemperaturen an der Messstelle BT7

6.4.2 Ergebnisse der transienten Temperaturfeldanalyse

Durch die Parameterstudie für die Wärmeleitfähigkeit wurde ein praxistaugliches FE-Wärmeflussmodell gewonnen, das zur Quantifizierung des jahreszeitlichen Temperatureinflusses dient. In Abb. 6.8 sind die berechneten Betontemperaturen sowie die gemessenen Luft- und Wassertemperaturen über den betrachteten Zeitraum von Anfang November 1999 bis Mitte Juni 2002 aufgetragen. Demnach folgt die obere Wassertemperatur mit stark abgeschwächter Amplitude und einer Phasenverschiebung der Lufttemperatur. Die Grafik belegt deutlich sowohl den Jahresgang aller Temperaturen als auch die Abhängigkeit der Betontemperaturen von den Umgebungstemperaturen. Die Betontemperaturen nehmen mit zunehmendem Abstand von der Maueroberfläche in ihrer Amplitude ab und stellen sich gegenüber der Lufttemperatur zu späteren Zeitpunkten ein, sind also phasenverschoben. Die jahreszeitlichen Temperaturschwankungen reduzieren sich von der Krone (BT6 und BT7) nach unten deutlich und sind im Sohlbereich (BT1) kaum festzustellen. Zudem bauen sich die kurzfristigen Temperaturschwankungen nach innen hin ab und sind im Kern nicht mehr wahrzunehmen.

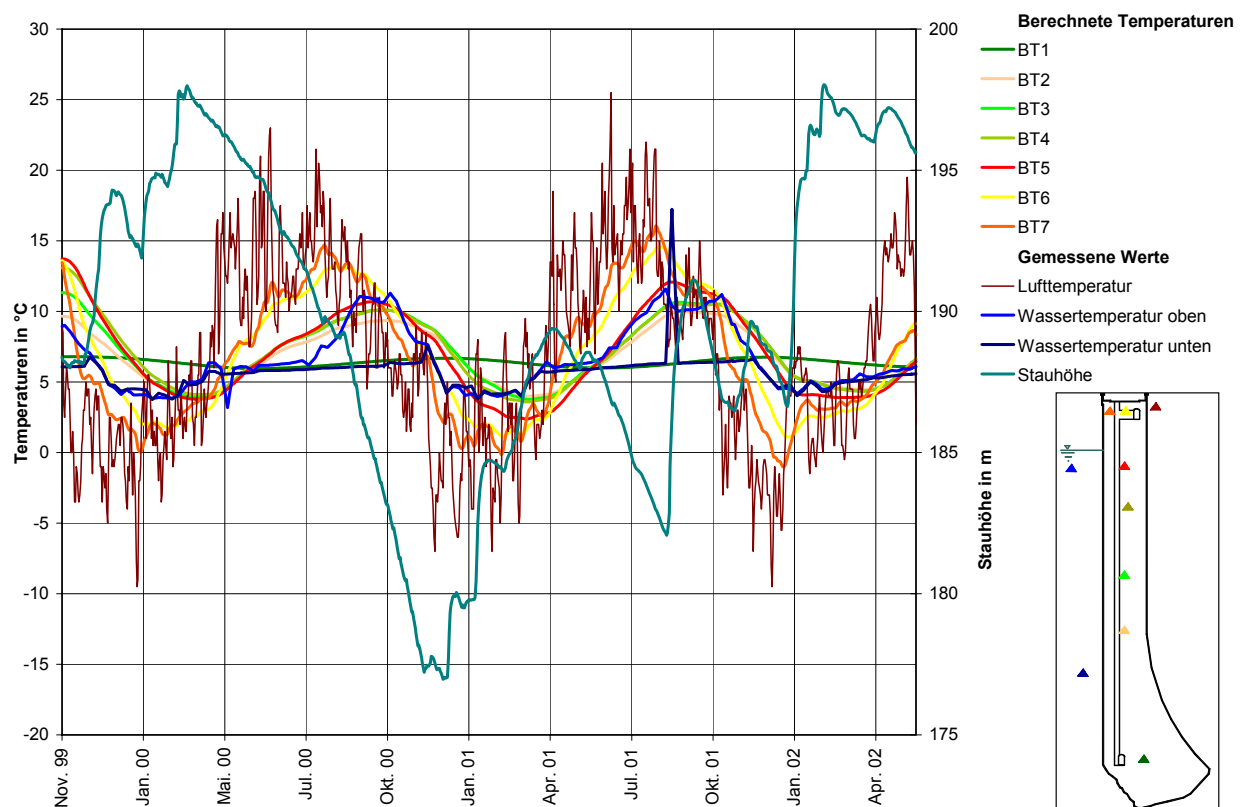


Abb. 6.8: Berechnete Betontemperaturen und gemessenen Luft- und Wassertemperaturen

Der Verlauf der Betontemperatur BT1 belegt den Einfluss der Wassertemperatur auf die Betontemperatur. Auch die Betontemperaturen BT2 bis BT5 spiegeln die dämpfende Wirkung der massiven Mauer und des Wassers wider. Die Begründung für diesen Effekt liefern die thermischen Materialkennwerte Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität von Wasser, Beton und Luft. Je höher die Wärmekapazität eines Materials ist, desto mehr Energie in Form von Wärme speichert es und desto ausgleichender wirkt es bei Temperaturschwankungen. Die Wärmekapazität von Wasser ist ungefähr doppelt so groß wie die von Beton, während im Vergleich die Wärmekapazität von Luft um den Faktor $4 \cdot 10^3$ kleiner ist als die von Wasser. Die Wärmeleitfähigkeit von trockenem Beton beträgt rund das Vierfache der Wärmeleitfähigkeit von Wasser und ist

etwa 60- bis 70-mal größer als die von Luft. Mit steigender Durchfeuchtung des Betons steigt die Wärmeleitfähigkeit des Betons noch weiter an. Infolge der großen Wärmekapazität des Wassers wird also wasserseitig eine Verzögerung und Dämpfung der Temperaturverteilung in der Mauer gegenüber der Lufttemperatur erzeugt. Die Schwankungen der Lufttemperatur werden luftseitig durch die Wärmekapazität des Betons reguliert, ohne dass sich das massive Bauwerk vollständig erwärmt. Im Kronenbereich (BT6 und BT7), der in der Regel von drei Seiten der Lufttemperatur ausgesetzt ist, ähnelt der Verlauf der Betontemperaturen sehr stark dem Verlauf der Lufttemperatur. Der Kronenbereich kann als repräsentativ für die Außenbereiche der Mauer betrachtet werden. Aufgrund der klimatischen Umweltbedingungen sind diese Bereiche stärkeren Temperaturschwankungen unterworfen als die davon unbeeinflussten Kernbereiche der Mauer. Nach [167] sind die Auswirkungen der Außentemperaturtagesgänge ab einer Tiefe von etwa einem halben Meter für die Temperaturverteilung in der Staumauer weitgehend abgeklungen.

Die Mauertemperatur wird also vorrangig durch die sich langsam ändernde Wassertemperatur und nur zweitrangig durch die Schwankungen der mittleren Tagestemperatur gegenüber der mittleren Jahrestemperatur einer Staumauer bestimmt. Dagegen werden die temperaturinduzierten Verformungsänderungen, die auf den Temperaturgradienten zwischen Kern- und Außenbereich zurückzuführen sind, primär durch die Lufttemperaturänderungen hervorgerufen, vgl. Kap. 6.6.

Die absolute Temperatur im Mauerkerne der Okerstaumauer schwankt im Jahresverlauf nur zwischen etwa 4°C und 12°C, während die Kronen- und Außenbereiche der Mauer dem Verlauf der Lufttemperatur sehr stark ähneln. Die Extremtemperaturen im Mauerquerschnitt werden im Frühjahr und Herbst erreicht, während die Temperaturextrema der Umgebung im Winter und Sommer auftreten, es existiert eine Phasenverschiebung der Temperaturganglinien von Luft-, Wasser- und Mauerkerntemperatur.

Die Untersuchungsergebnisse des Temperaturverlaufs in der Okerstaumauer liefern jahreszeitbedingte charakteristische Temperaturverteilungen, die beispielhaft für einen Zyklus von eineinhalb Jahren in Abb. 6.9 dargestellt sind. Im Winter, Januar, liegen minimale Umgebungstemperaturen vor und im Mauerkerne existiert ein Temperaturfeld mit Werten über den Luft- und Wassertemperaturen, d.h. die Betonmauer hat einen Wärmekern, der die gespeicherte Wärme in alle Richtungen abgibt. Es entsteht ein Wärmestrom vom Mauerkerne nach außen. Im Frühling, April, überschreitet die mittlere Lufttemperatur die Kerntemperatur, damit ändert sich die Richtung des Wärmestroms von außen nach innen, d.h. die Mauer wird erwärmt und im Mauerkerne stellt sich das jährliche Temperaturminimum ein. Im Sommer, Juli, erreichen die Umgebungstemperaturen ihr jährliches Maximum. Die Außenbereiche der Mauer sind in dieser Phase immer wärmer als der Kern, der Wärmestrom ins Innere erreicht sein Maximum. Mit dem Herbst, Oktober, sinkt die Umgebungstemperatur im Mittel wieder unter die Kerntemperatur der Mauer. Der Wärmestrom kehrt sich erneut um und damit beginnt durch Abgabe der gespeicherten Wärme an die Umgebung die Abkühlung im Mauerinneren, d.h. im Mauerkerne wird das jährliche Temperaturmaximum erreicht.

Die aus der transienten Temperaturfeldanalyse gewonnenen Erkenntnisse über die Temperaturentstehung und -verteilung im Mauerkörper werden durch die Ergebnisse von Temperaturuntersuchungen an einigen Gewichtsstaumauern bestätigt und ergänzt, vgl. z.B. [13], [106], [145], [167] oder [169].

Die Untersuchungsergebnisse des Temperaturverlaufs an der Okerstaumauer und denen der verschiedenen Staumauern aus der Literaturstudie (s. o.) erlauben es, die zuvor beschriebenen, jahreszeitlich bedingten charakteristischen Temperaturverteilungen im Querschnitt von massiven Staumauern als allgemein gültig für den norddeutschen Raum zu erklären. Aufgrund geographischer und klimatischer Situationen können im Einzelfall geringe zeitliche Abweichungen von den beschriebenen Temperaturzuständen auftreten.

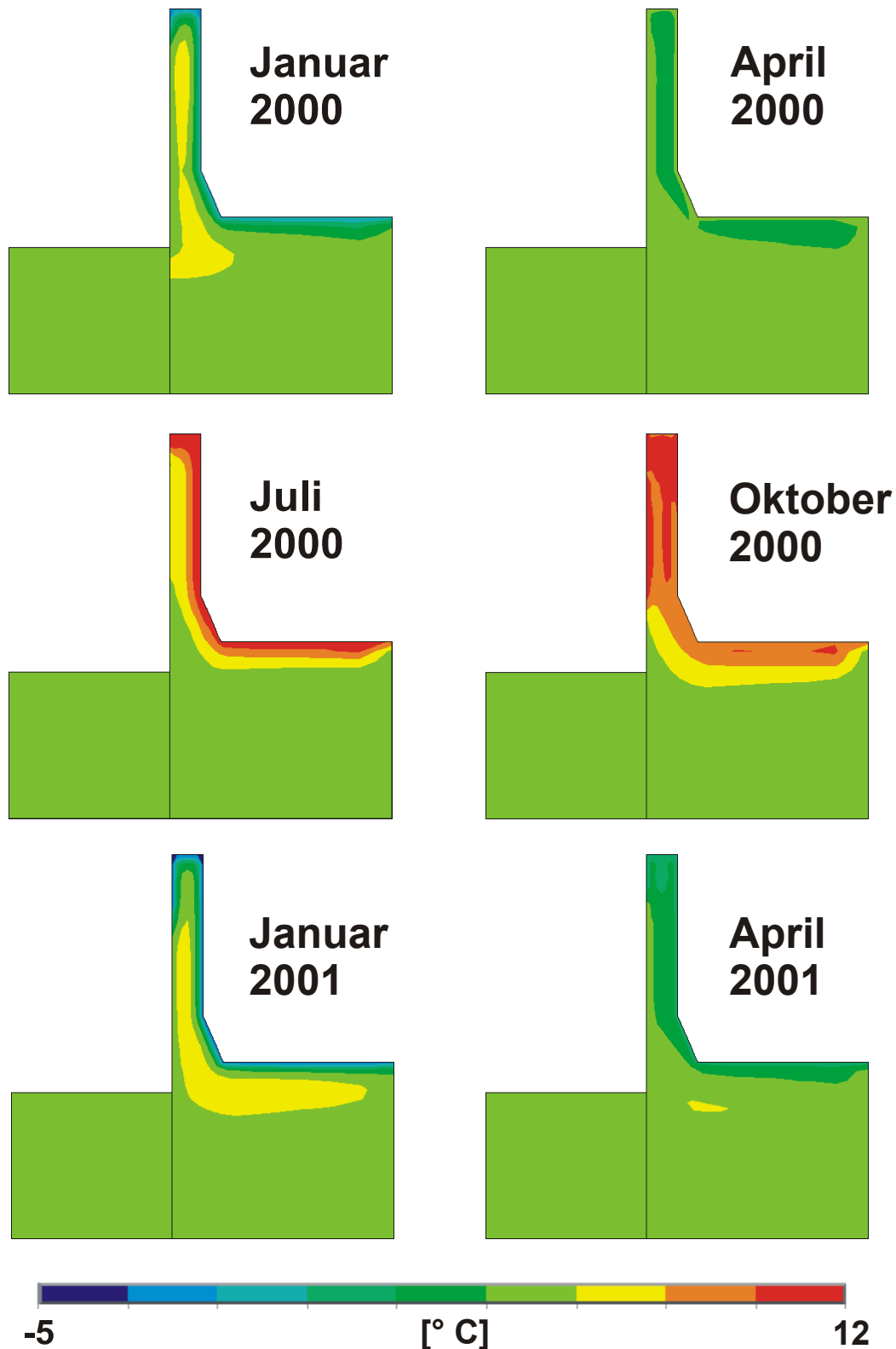


Abb. 6.9: Berechnete Temperaturverteilungen in Mauermitte der Okerstaumauer

6.5 Parameterstudien in der Strukturberechnung unter Einbeziehung der Messergebnisse

6.5.1 Allgemeines zu den Parameterstudien

Die Parameterstudien wurden so durchgeführt, dass jeweils nur ein Parameter variiert wurde, um den Einfluss dieses einen Parameters auf die Berechnungsergebnisse herauszuarbeiten. Für die Einwirkungen wurden die realen Einwirkungsgrößen aus Stauhöhenunterschieden und Änderungen der Betontemperaturen infolge der Umgebungstemperaturschwankungen aus der transienten Temperaturfeldanalyse verwendet. Nähere Angaben über die Kriterien für die Auswahl der verwendeten Vergleichszeitpunkte, um sinnvolle Ausgangsbedingungen für die Parameteroptimierung zu erhalten, sind in Kapitel 6.5.2 und 6.5.3 beschrieben. In Tab. 6.1 sind die Vergleichszeitpunkte aufgelistet, die für die verschiedenen Parameterstudien verwendet wurden und für die die Ergebnisse der Studien in den Abb. 6.10 bis Abb. 6.17 dargestellt sind.

Als Vergleichsgrößen für die Parameterstudien dienen die gemessenen Verformungsdifferenzen zwischen zwei Zeitpunkten. Bei den Parameterstudien wurden für den Vergleich mit den Messungen die Berechnungsergebnisse an der Fuge 5/6, also ungefähr in Mauermitte, ausgewertet, da in der Fuge 5/6 der Schwerpunkt der Messungen liegt. Dennoch wurden im Rahmen der Parameteroptimierung auch einzelne Kontrollvergleiche an den übrigen Messpositionen durchgeführt und in die Bewertung einbezogen. Diese sind hier jedoch nicht separat dargestellt.

Für den Vergleich der berechneten Verformungsänderungen infolge der Variation der Parameterwerte mit den gemessenen Größen wurden grundsätzlich als Beurteilungskriterium sowohl die Differenzen der Kronenverschiebung als auch die Neigungsänderungen der Schwergewichtsmauer herangezogen. Bei der graphischen Darstellung wurde der Schwerpunkt auf den Vergleich der Neigungsänderungen gelegt, weil für einige betrachtete Zeitpunkte aufeinander folgende Tage gewählt wurden und in den Fällen keine direkt gemessene Kronenverschiebung vorliegt, da die Lotablesung nur einmal wöchentlich durchgeführt wurde. Für diese Vergleichszeitpunkte ist es sinnvoller, direkt die gemessene Größe mit den Berechnungsergebnissen zu vergleichen, da ansonsten erst die Kronenverschiebung aus der gemessenen Neigungsänderung berechnet werden müsste.

				Wassertemperatur			Neigungsänderung Fuge 5/6		
Datum	Datumszahl	Stauhöhe [m]	Lufttemperatur [°C]	WT _{oben} [°C]	WT _{unten} [°C]	Lot 5/6 [mm]	Δx_4 [mrad]	Δy_4 [mrad]	ΔT_4 [°C]
nur ΔT ($\Delta w \approx 0$)									
22.10.2000	36821	183,93	10,00	10,64	6,13	147,0	-0,126	-0,028	-2,40
11.02.2001	36933	183,91	6,00	4,04	4,04	155,5	-0,135	-0,110	-12,00
17.03.2001	36967	185,04	2,00	4,28	4,29	157,0	-0,116	-0,123	-12,10
29.07.2001	37101	185,00	17,00	9,00	6,16	144,0	-0,044	0,105	3,00
nur Δw ($\Delta T \approx 0$)									
09.03.2000	36594	196,57	4,50	4,02	4,03	163,5	-0,122	-0,185	-12,30
10.03.2000	36595	197,68	3,00	4,05	4,07		-0,116	-0,205	-12,30
27.01.2002	37283	190,30	6,00	4,37	4,43		-0,078	-0,175	-12,30
28.01.2002	37284	191,78	6,50	4,32	4,33	160,0	-0,074	-0,182	-12,30
Δw und ΔT									
16.05.2000	36662	195,57	18,00	6,04	5,62	155,5	-0,013	-0,025	-1,50
10.01.2001	36901	179,78	-1,00	4,62	4,69	152,5	-0,171	-0,037	-10,50

Tab. 6.1: In den Parameterstudien beispielhaft dargestellte Vergleichszeitpunkte

6.5.2 Der Wärmeausdehnungskoeffizient der Okerstaumauer

Der Wärmeausdehnungskoeffizient ist nur für strukturmekanische Berechnungen von Bedeutung, denn es handelt sich dabei um den Materialkennwert, der das thermische Dehnverhalten beschreibt. Dementsprechend hat er nur Einfluss, wenn auch Temperaturunterschiede im Bauteil auftreten. Es wurden nur Datensätze aus den Messdaten ausgewählt, bei denen eine möglichst gleiche Stauhöhe vorlag, vgl. Tab. 6.1, um den Einfluss der Stauhöhenänderungen für die Parameteroptimierung auszuschließen. Damit sind auch nur die Temperaturunterschiede in der Staumauer, die aus den Ergebnissen der transienten Temperaturfeldanalyse resultieren, als Einwirkung auf das Strukturmodell aufzubringen. Als Verformungsmodul für den Grobrüttelbeton der Mauer liegt der Parameterstudie der Wert von 37.000 N/mm² zugrunde und entsprechend für den Untergrund ein Verformungsmodul von 24.000 N/mm² bzw. für den Widerlagerbereich von 18.000 N/mm². Der Einfluss des V-Moduls auf die Berechnungsergebnisse ist in Kap. 6.5.3 ausführlich erläutert. Für den Wärmeausdehnungskoeffizient wurden im Rahmen der Sensitivi-

tätsstudie Werte von $\alpha = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $\alpha = 5,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $\alpha = 7,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ und $\alpha = 10,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ eingesetzt, und mit diesen Werten jeweils die Strukturberechnung zur Ermittlung der Verformungsänderungen infolge der Bauwerkstemperaturänderungen durchgeführt. Der Vergleich der Berechnungsergebnisse zeigt deutliche Unterschiede sowohl bei den Neigungsänderungen als auch bei der Differenz der Kronenverformung durch die Variation des Wärmeausdehnungskoeffizienten, vgl. beispielhaft die Diagramme aus Abb. 6.10 bis Abb. 6.12. Die Ergebnisse weichen um rund 400 % voneinander ab. Die beste Übereinstimmung mit den Messergebnissen, die in den Ergebnisdarstellungen grundsätzlich grün markiert sind, wurde einheitlich mit dem Wärmeausdehnungskoeffizienten von $\alpha = 5,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ erzielt, so dass dieser Wert mit Hilfe der durchgeführten Studien als endgültiger Arbeitswert des Wärmeausdehnungskoeffizient für die Okerstaumauer festgelegt wurde. Der Wert von $\alpha = 5,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ entspricht der unteren Grenze des aus der Literatur ermittelten Wertebereichs für Beton mit dem Zuschlag Diabas, vgl. Tab. 5.3 und stellt somit ein plausibles Ergebnis dar.

Die Diagramme, Abb. 6.10 bis Abb. 6.12, zur Erläuterung der Ergebnisse aus der Parameterstudie wurden nur beispielhaft für zwei Untersuchungen dargestellt, insgesamt wurden die Untersuchungen zu zehn verschiedenen Kombinationen von Vergleichszeitpunkten im Jahresverlauf durchgeführt und in die Ergebnisbewertung einbezogen.

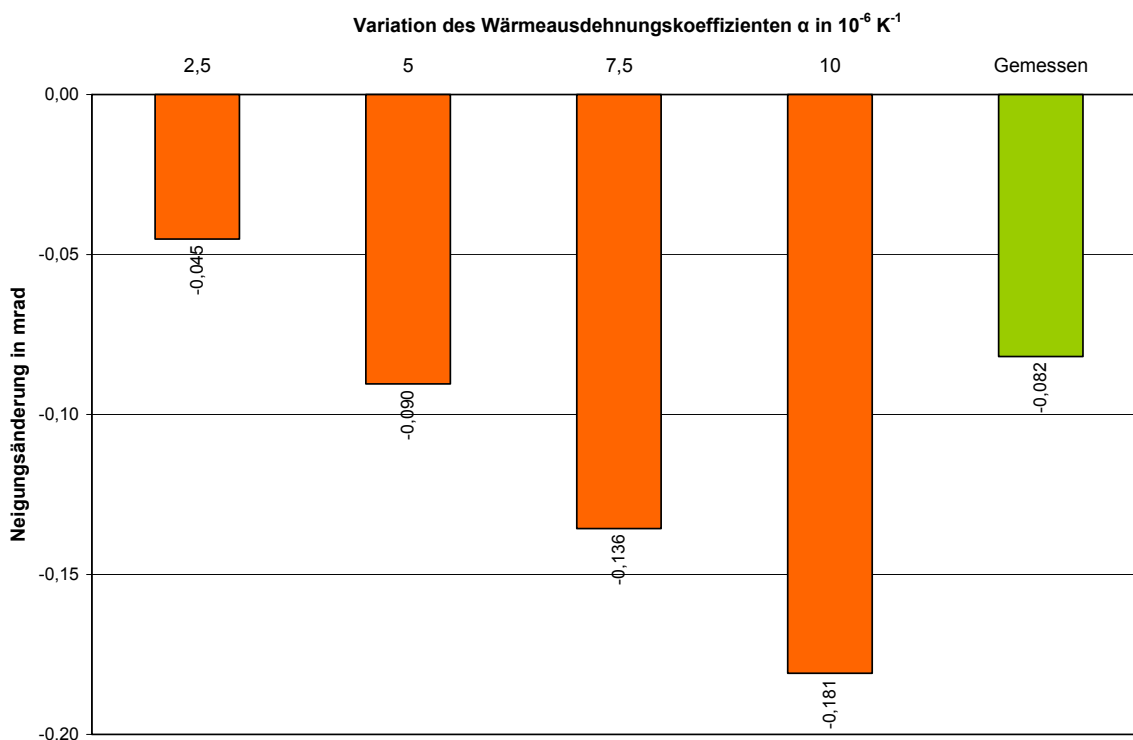


Abb. 6.10: Berechnete Neigungsänderungen aus verschiedenen Wärmeausdehnungskoeffizienten infolge der Temperaturänderungen zwischen dem 22. Oktober 2000 und dem 11. Februar 2001

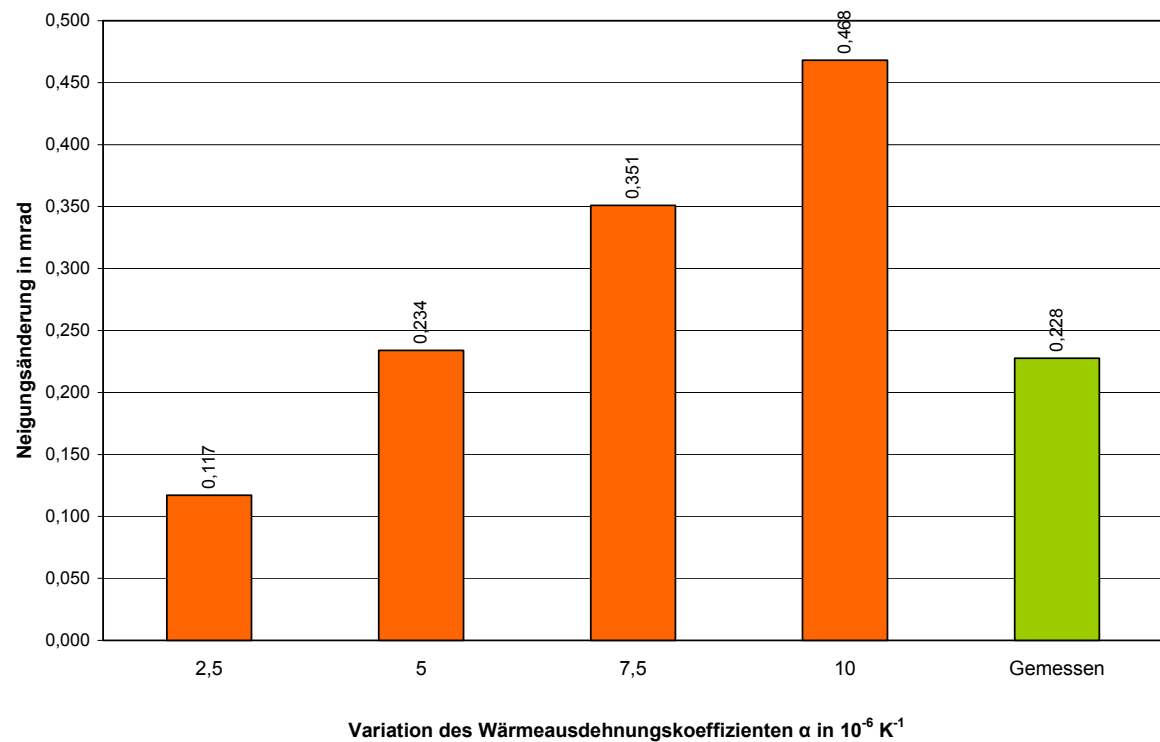


Abb. 6.11: Berechnete Neigungsänderungen aus verschiedenen Wärmeausdehnungskoeffizienten infolge der Temperaturänderungen zwischen dem 17. März 2001 und dem 29. Juli 2001

In Abb. 6.12 sind die berechneten Verschiebungsdifferenzen entlang der Fuge 5/6 aus verschiedenen Wärmeausdehnungskoeffizienten dargestellt, die aus den Temperaturänderungen zwischen dem 17. März 2001 und dem 29. Juli 2001 resultieren.

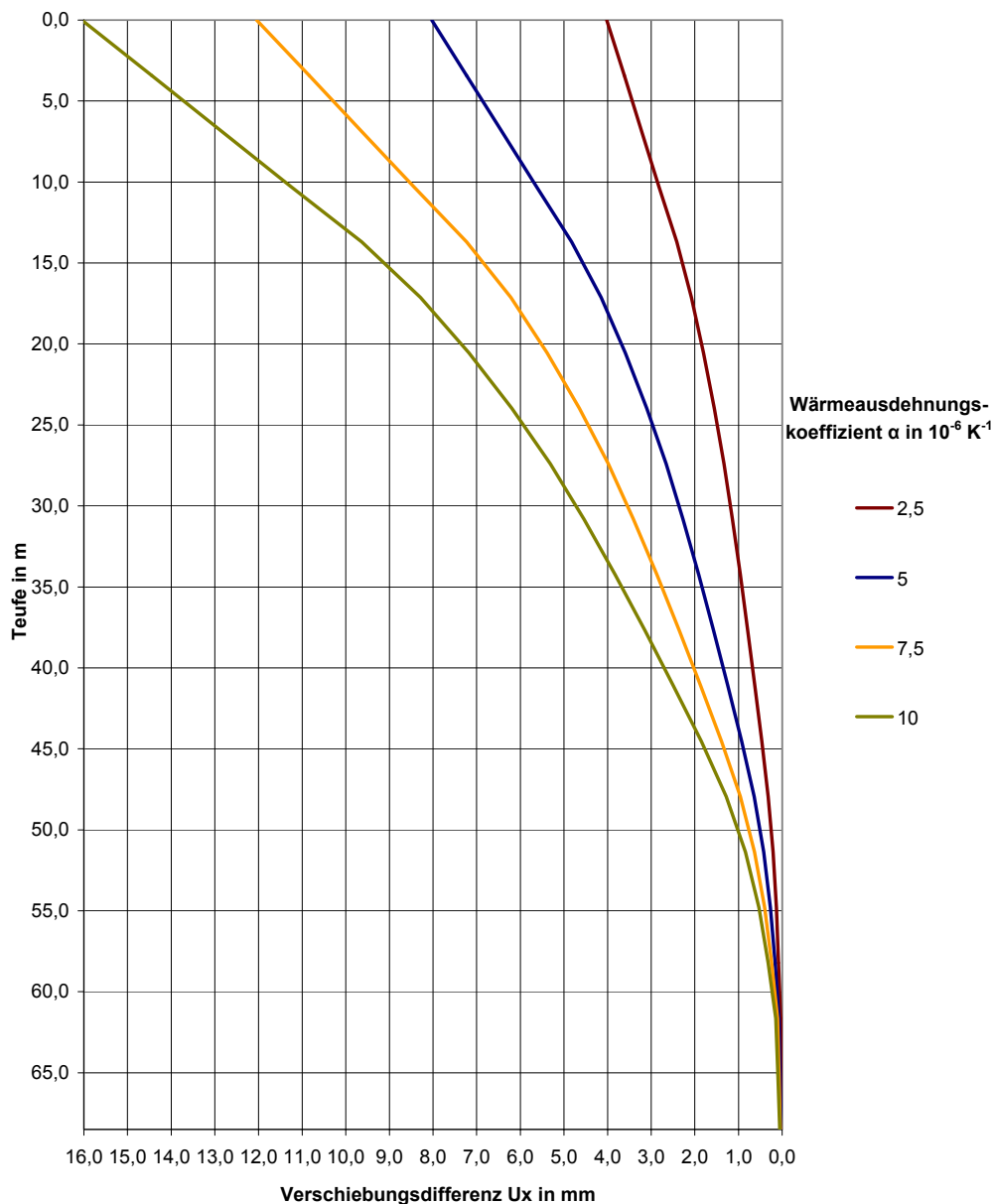


Abb. 6.12: Berechnete Verschiebungsdifferenzen entlang der Fuge 5/6 aus verschiedenen Wärmeausdehnungskoeffizienten infolge der Temperaturänderungen zwischen dem 17. März 2001 und dem 29. Juli 2001

6.5.3 Die Verformungsmoduln der Okerstaumauer

6.5.3.1 Allgemeines zur Parameterstudie der Verformungsmoduln

In Kap. 5.2.3 und Kap. 5.2.4 wurde bereits erläutert, dass im FE-Modell für den Untergrund zwei Materialbereiche unterschieden werden, um rechnerisch über die Größe des Verformungsmoduls für den Widerlagerbereich einen größeren Felsbereich zu simulieren. Über die Variation dieses V-Moduls sollte die Ausdehnung des Widerlagerbereichs für die Kalibrierung des Strukturmodells herangezogen werden, ohne für den gesamten Felsbereich unrealistische Annahmen für den V-Modul zu treffen.

Dementsprechend werden im Rahmen der Parameterstudie für die V-Moduln insgesamt drei Parameter variiert, zum einen der V-Modul des Grobrüttelbetons der Staumauer, zum zweiten der V-Modul des Untergrundes und zum dritten der V-Modul des Widerlagerbereichs zur Simulation der optimalen Widerlagerausdehnung. Die Wertebereiche für die drei Parameter sind in Tab. 5.4 angegeben.

Gemäß Kap. 5.2.4.2 wurde die Querdehnzahl für alle Berechnungen mit dem Wert von 0,2 festgelegt.

Kombinationsnummer	Zugehörige Variation der V-Moduln	
1	V-Modul der Mauer:	30.000 N/mm ²
	V-Modul des Untergrundes:	12.000 N/mm ²
	V-Modul des Widerlagerbereichs:	12.000 N/mm ²
2	V-Modul der Mauer:	35.000 N/mm ²
	V-Modul des Untergrundes:	12.000 N/mm ²
	V-Modul des Widerlagerbereichs:	12.000 N/mm ²
3	V-Modul der Mauer:	35.000 N/mm ²
	V-Modul des Untergrundes:	18.000 N/mm ²
	V-Modul des Widerlagerbereichs:	12.000 N/mm ²
4	V-Modul der Mauer:	37.000 N/mm ²
	V-Modul des Untergrundes:	24.000 N/mm ²
	V-Modul des Widerlagerbereichs:	18.000 N/mm ²
5	V-Modul der Mauer:	40.000 N/mm ²
	V-Modul des Untergrundes:	24.000 N/mm ²
	V-Modul des Widerlagerbereichs:	18.000 N/mm ²

Tab. 6.2: Erstellte Kombinationen der V-Moduln für die Parameterstudie

Bei den verwendeten Werten für die Verformungsmodule wurde die Zunahme des V-Moduls durch die Baugrundverbesserungsmaßnahmen berücksichtigt. Die drei Parameter werden in fünf Kombinationen mit realistischen Werten für die einzelnen Parameter variiert, vgl. Tab. 6.2. Mit Hilfe dieser Kombinationen wird darauf geachtet, dass die Verhältnisse der V-Moduln zueinander sinnvoll sind. Die gewählten Kombinationen der einzelnen V-Moduln wurden durch eine Pilotstudie aufeinander abgestimmt.

6.5.3.2 Parameterstudie für Einwirkungsdifferenzen aus der Stauhöhe

Für die Parameterstudie der Verformungsmoduln der Mauer und des Untergrundes wurden im ersten Schritt die zu betrachtenden Zeitpunkte so gewählt, dass nur Einwirkungsdifferenzen infolge der Stauhöhenänderungen zu berücksichtigen sind. Die Staumauerverformungen infolge der Stauhöhenänderungen werden primär durch die Verformungsmoduln bestimmt. Wenn auch Temperaturdifferenzen zu berücksichtigen sind, hat zusätzlich der Wärmeausdehnungskoeffizient Auswirkungen auf das Berechnungsergebnis. Dieser war Bestandteil einer separaten Sensitivitätsstudie, vgl. Kap. 6.5.2. Um diese Einflüsse vorerst auszuschließen, wurden die Ver-

gleichszeitpunkte entsprechend gewählt. Da die Temperaturverteilung einen zeitabhängigen Prozess darstellt, vgl. Kap. 5.2.7, können nicht beliebige Zeitpunkte mit ähnlichen Umgebungstemperaturen für die Parameterstudie herangezogen werden. Es wurden deshalb aus den Messreihen aufeinander folgende Tage möglichst ohne Änderung der Umgebungstemperaturen und dafür mit großen Stauhöhenschwankungen ausgewählt. Wenn die Stauhöhenänderung der Vergleichszeitpunkte nahezu Null beträgt, sind auch die daraus resultierenden Verformungsänderungen nahezu Null und damit ist keine Parameteroptimierung möglich. Anhand der durch die transiente Temperaturfeldanalyse berechneten Mauertemperaturen wurde für die betrachteten Vergleichszeitpunkte im Vorfeld kontrolliert, ob die Differenztemperaturen im Mauerkörper tatsächlich nahezu Null betragen. Dies konnte für die ausgewählten Vergleichszeitpunkte bestätigt werden. Die Diagramme zur Erläuterung der Ergebnisse aus der Parameterstudie wurden für zwei Untersuchungen dargestellt. Insgesamt wurden die Untersuchungen zu zehn verschiedenen Kombinationen von Zeitpunkten im Jahresverlauf durchgeführt und in die Ergebnisbewertung einbezogen. Die gewählten, zusammengehörigen Zeitpunkte für die Parameterstudie und die zugehörigen gemessenen Einwirkungen sind Tab. 6.1 zu entnehmen.

Die Ergebnisse belegen einheitlich, dass bei Stauhöhenänderungen der Einfluss verschiedener V-Moduln auf die Berechnungsergebnisse deutlich geringer ist als der Einfluss des Wärmeausdehnungskoeffizienten bei Temperaturunterschieden. Diese Ergebnisse sind in den Abb. 6.13 bis Abb. 6.15 präsentiert. Weiter lässt sich aus den Berechnungsergebnissen mit den variierten V-Moduln eindeutig ableiten, dass die Veränderung des V-Moduls der Staumauer eine größere Abweichung der Berechnungsergebnisse voneinander hervorruft, als die Veränderung des V-Moduls des Untergrunds oder des Widerlagerbereichs. Deren Einfluss auf die Berechnungsergebnisse ist vergleichbar und von untergeordneter Bedeutung, da er maximal 5% beträgt. Entsprechende Studien wurden durchgeführt, werden hier aber nicht als separate Ergebnisgraphik präsentiert, weil die Tendenz bereits aus den vorhandenen Diagrammen zu entnehmen ist. Die Diagramme der Abb. 6.13 und Abb. 6.14 zeigen bei Erhöhung der V-Moduln eine Reduzierung der berechneten Verformungsänderung, die bei Erhöhung des V-Moduls des Betons stärker abnimmt. Im Vergleich mit den Messungen führten für den Fall von Stauhöhenänderungen folgende Parameterwerte zu den besten Ergebnissen: Der V-Modul des Staumauerbetons wurde mit 37.000 N/mm^2 , der V-Modul des Untergrunds mit 24.000 N/mm^2 und der des Widerlagerbereichs mit 18.000 N/mm^2 bestimmt.

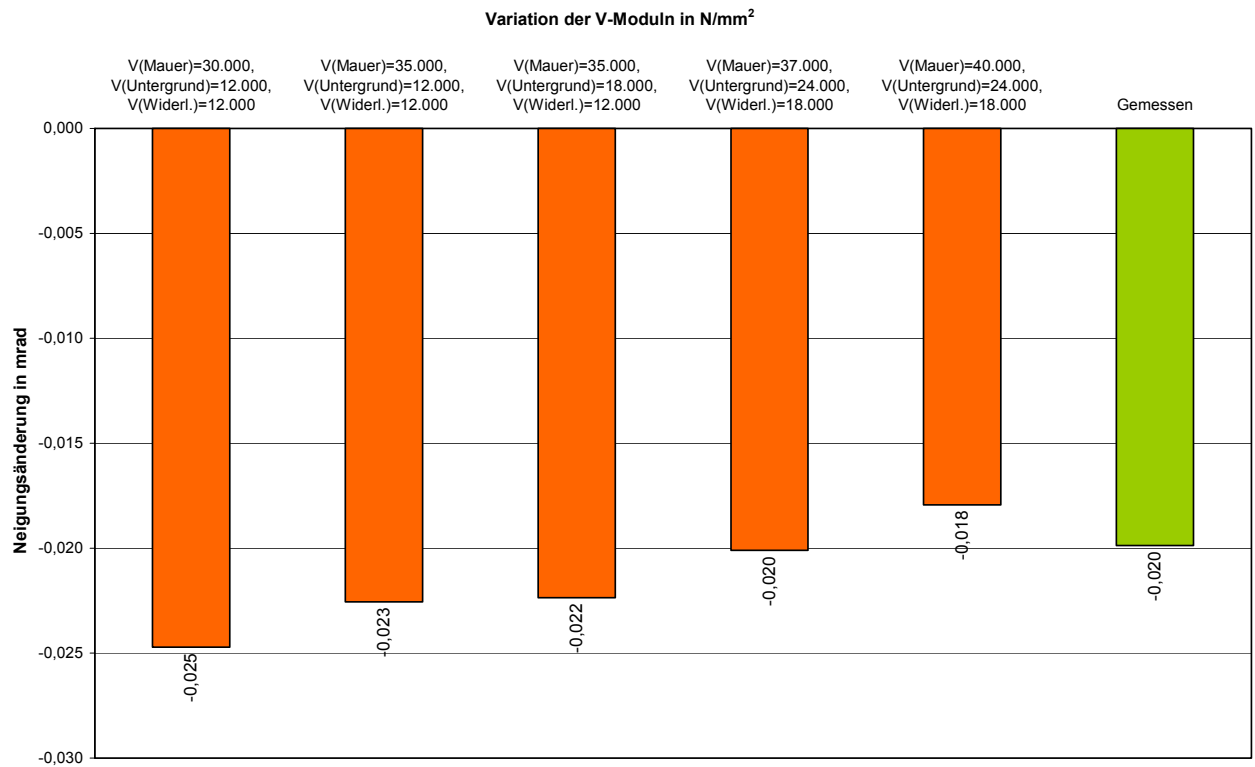


Abb. 6.13: Berechnete Neigungsänderungen für verschiedene Verformungsmoduln im Vergleich mit den Messungen am Beispiel der Differenzstauhöhe zwischen dem 9. und 10. März 2000

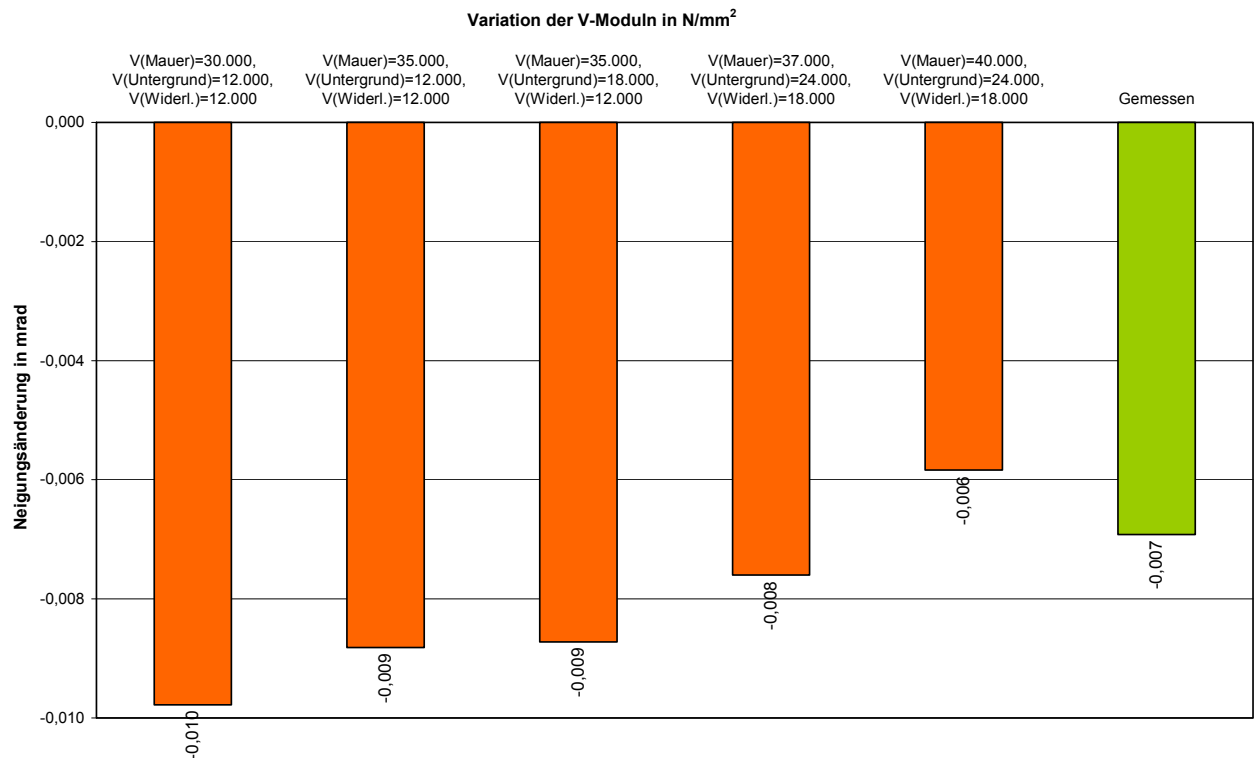


Abb. 6.14: Berechnete Neigungsänderungen für verschiedene Verformungsmoduln im Vergleich mit den Messungen am Beispiel der Differenzstauhöhe zwischen dem 27. und 28. Januar 2002

In Abb. 6.15 sind die berechneten Verschiebungsdifferenzen für verschiedene V-Moduln entlang der Fuge 5/6, die aus den Stauhöhenänderungen zwischen dem 27. und 28. Januar 2002 resultieren, dargestellt.

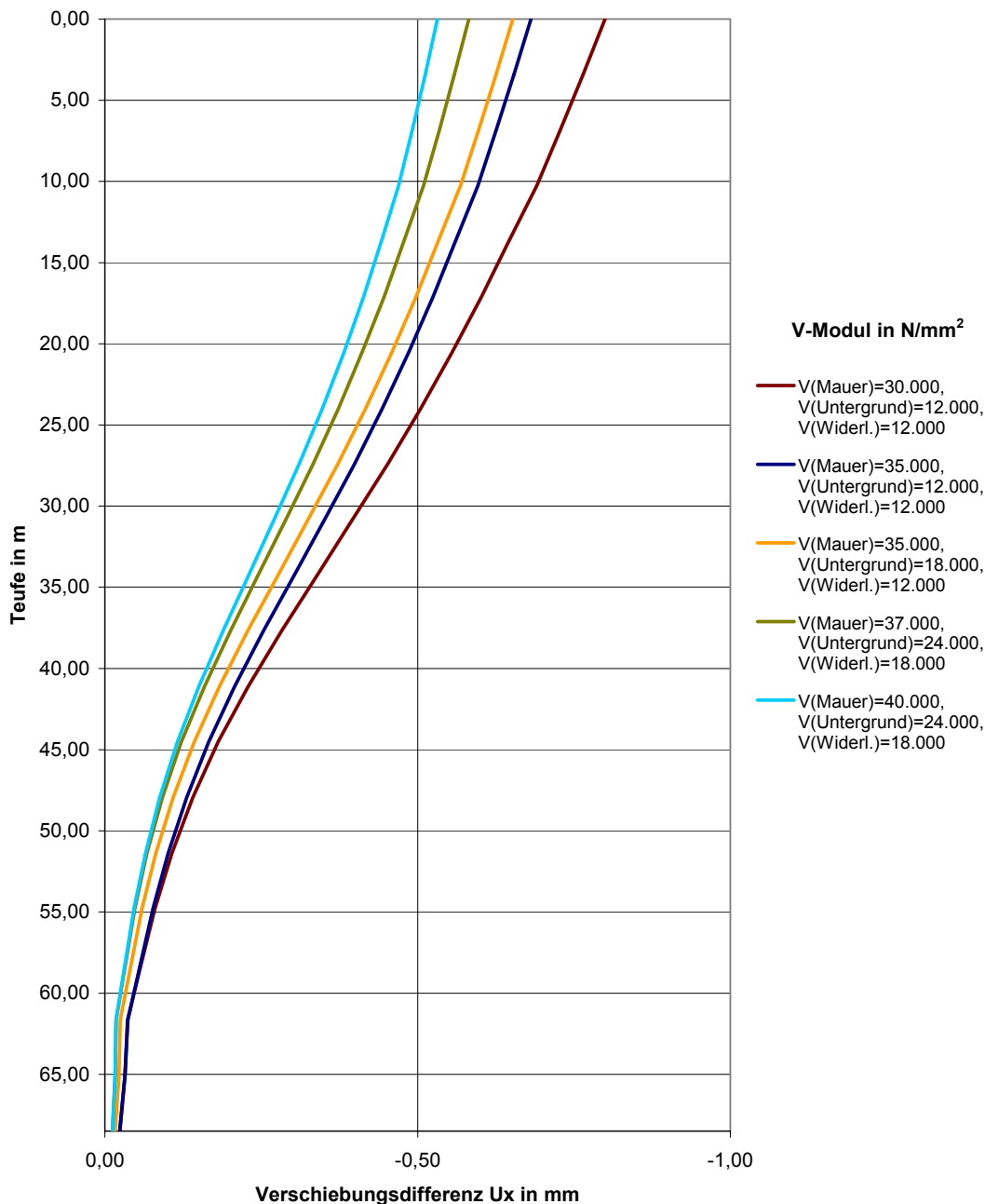


Abb. 6.15: Berechnete Verschiebungsdifferenzen für verschiedene Verformungsmoduln im Vergleich mit den Messungen am Beispiel der Differenzstauhöhe zwischen dem 27. und 28. Januar 2002

Bei der Betrachtung der Ergebnisse der vorliegenden Parameterstudie fällt jedoch auf, dass die Ergebnisunterschiede infolge verschiedener Parameterwerte in fast allen auftretenden Fällen von Stauhöhenänderungen in der Größenordnung der Messgenauigkeit der Neigungssensoren liegen. Deshalb wurde die Parameterstudie zusätzlich auch noch an den Vergleichszeitpunkten, die bereits für die Optimierung des Wärmeausdehnungskoeffizienten verwendet wurden, durchgeführt.

6.5.3.3 Parameterstudie für Einwirkungsdifferenzen aus der Temperatur

Die ergänzende Parameterstudie für die V-Moduln infolge von Änderungen der Bauwerkstemperaturen wurden mit Datensätzen durchgeführt, bei denen eine möglichst gleiche Stauhöhe vorlag, vgl. Tab. 6.1. Damit sind, wie schon für die Kalibrierung des Wärmeausdehnungskoeffizienten, nur die Temperaturunterschiede in der Staumauer, die aus den Ergebnissen der transienten Temperaturfeldanalyse resultieren, als Einwirkung auf das Strukturmodell aufzubringen.

Auch diese Untersuchungen wurden an zehn verschiedenen Kombinationen von Vergleichszeitpunkten im Jahresverlauf durchgeführt und in die Ergebnisbewertung einbezogen. Das Diagramm in Abb. 6.16 zeigt die Ergebnisse der Parameterstudie für die Verformungsänderungen infolge der Mauertemperaturänderungen zwischen dem 17. März 2001 und dem 29. Juli 2001.

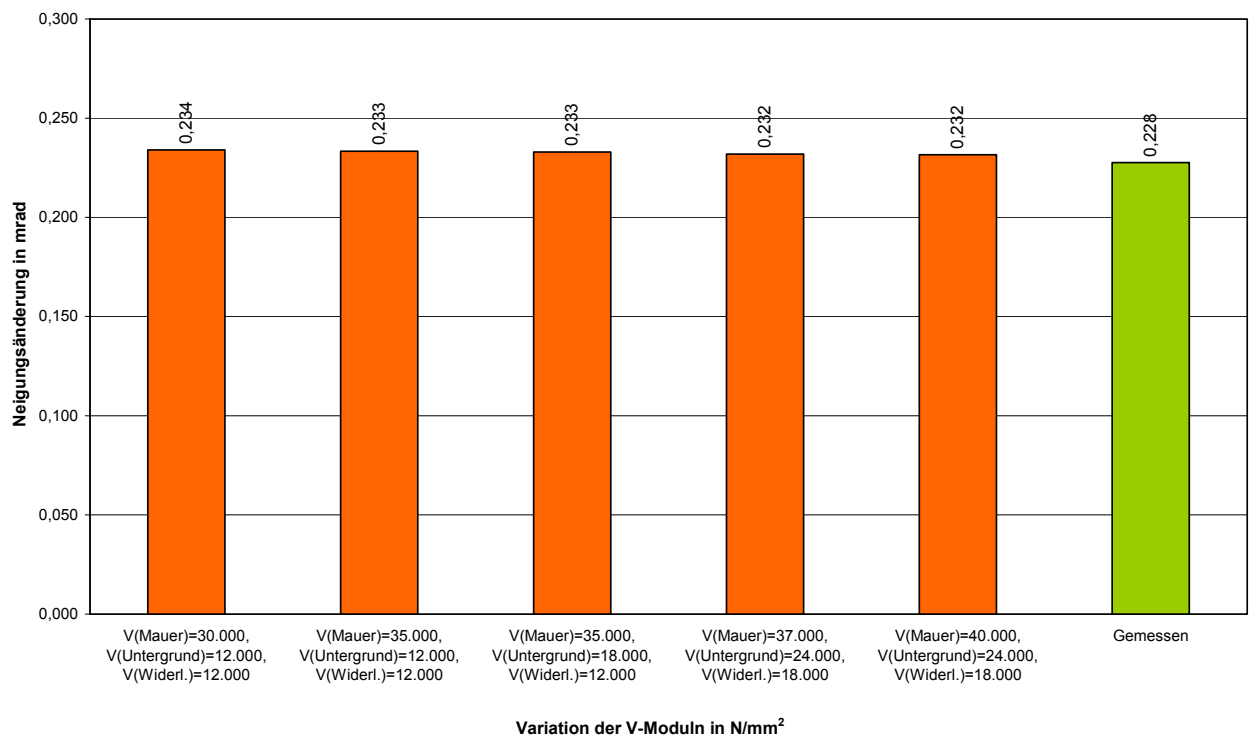


Abb. 6.16: Berechnete Neigungsänderungen für verschiedene Verformungsmoduln im Vergleich mit den Messungen am Beispiel der Temperaturänderungen in der Mauer zwischen dem 17. März 2001 und dem 29. Juli 2001

Die Ergebnisse belegen die Erkenntnisse aus der Studie, bei der ausschließlich Vergleichszeitpunkte mit Stauhöhenänderungen für die Berechnung herangezogen wurden. Unter dem Einfluss von Temperaturänderungen sind zwischen den verschiedenen Parameterwerten für die V-Moduln kaum Änderungen der Berechnungsergebnisse festzustellen. Bei Betrachtung der Größenordnung der Ergebnisabweichungen liegen diese wieder im Rahmen der Messgenauigkeit der Nivel 20.

Im Vergleich mit den Messungen werden die ermittelten Parameterwerte von 37.000 N/mm² für den V-Modul der Mauer, von 24.000 N/mm² für den V-Modul des Untergrunds und von 18.000 N/mm² für den des Widerlagerbereichs bestätigt.

6.5.3.4 Parameterstudie für Einwirkungsdifferenzen aus Stauhöhe und Temperatur

Zur „Verifizierung“ der Ergebnisse aus der Parameterstudie für die verschiedenen V-Moduln, die zum einen an Vergleichszeitpunkten mit unterschiedlichen Stauhöhen und zum anderen an Vergleichszeitpunkten mit Temperaturänderungen ermittelt wurden, wurde die Parameterstudie auch noch an Vergleichszeitpunkten durchgeführt, bei denen Einflüsse aus beiden Einwirkungsdifferenzen zu berücksichtigen sind. Als Basis der Untersuchung wurden fünf verschiedene Kombinationen von Vergleichszeitpunkten im Jahresverlauf durchgeführt und in die Ergebnisbewertung einbezogen. Die Abb. 6.17 zeigt die Ergebnisse der Parameterstudie für die Verformungsänderungen infolge der Differenzstauhöhe und -temperatur zwischen dem 16. Mai 2000 und dem 10. Januar 2001.

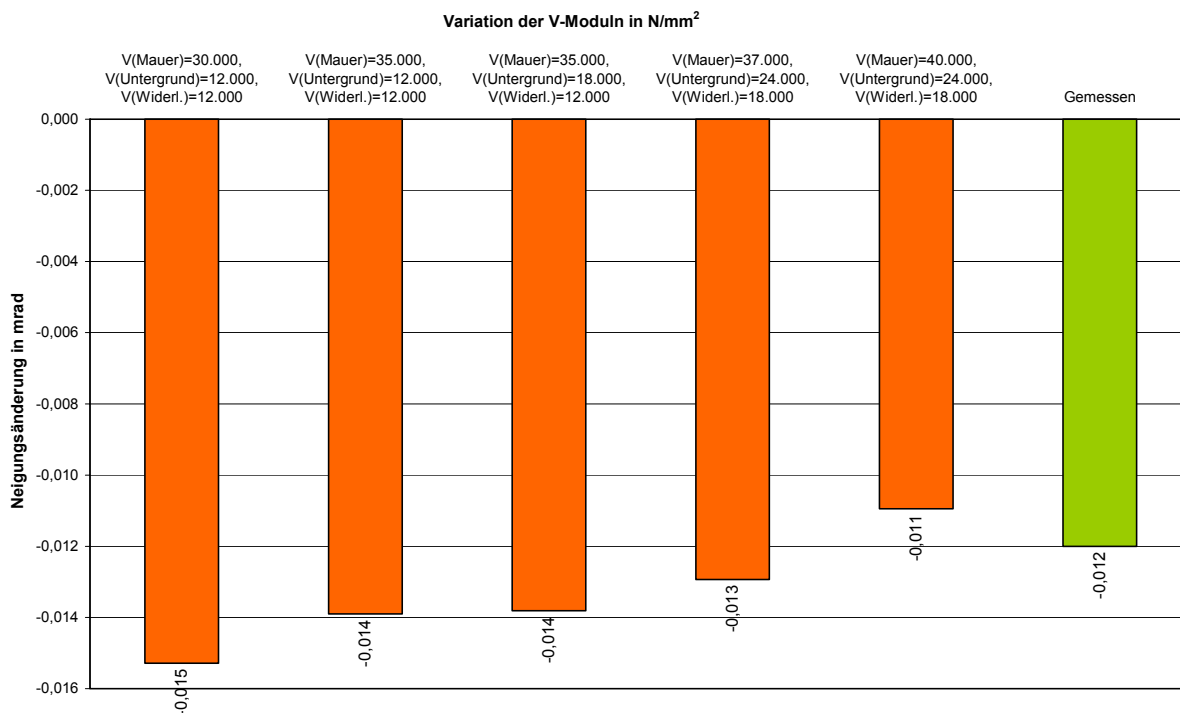


Abb. 6.17: Berechnete Neigungsänderungen für verschiedene Verformungsmoduln im Vergleich mit den Messungen am Beispiel der Differenzstauhöhe und -temperatur zwischen dem 16. Mai 2000 und dem 10. Januar 2001

Auch anhand dieser Ergebnisse bestätigen sich alle bereits gewonnen Erkenntnisse. Der Einfluss des V-Moduls der Mauer ist merklich größer als der der Verformungsmoduln für den Untergrund und den Widerlagerbereich. Insgesamt sind die Einflüsse der V-Moduln jedoch eher gering, insbesondere im Vergleich auf die Auswirkungen von verschiedenen Wärmeausdehnungskoeffizienten. Sie haben auch bei den kombinierten Einwirkungsdifferenzen die Größenordnung der Messgenauigkeit der Nivel 20.

Die Parameterstudie für die V-Moduln zeigt, dass die Veränderung dieser Parameterwerte, insbesondere die der Verformungsmodulwerte für den Untergrund- und Widerlagerbereich, in realistischen Schwankungsbreiten nur einen sehr geringen Einfluss auf die Berechnungsergebnisse haben. Demzufolge darf die natürliche Streuung der Materialkennwerte, die bei einem massiven Bauwerk wie der Staumauer und dem anstehenden inhomogenen Untergrund auftritt, für die durchgeführten Untersuchungen des Staumauerverformungsverhaltens auf jedem Fall vernachlässigt werden.

6.5.4 Numerische Simulation der gemessenen Verformungen

Die Daten der Verformungsmessungen liegen je nach Messprinzip im täglichen oder wöchentlichen Zyklus vor, vgl. Kap. 4.2. Um die Qualität der Berechnungen und auch der Messungen beurteilen zu können, erscheint ein Vergleich des Verlaufs der Verformungsmessungen mit den entsprechenden berechneten Verformungen sinnvoll. Der Rechenaufwand wäre sehr hoch, wenn jeder Tag der zweieinhalb Jahre Messwerterfassung, der schon bei der transienten Temperaturfeldanalyse aufgrund des instationären Prozesses berechnet werden musste, mit dem Strukturmodell berechnet worden wäre. Aufgrund der zeitlichen Verläufe der Verformungsmessungen bot es sich sinnvollerweise an, die strukturmechanische Analyse der Verformungen nur in zweckmäßig festgelegten zeitlichen Abständen zu berechnen. Die Verformungsänderungen der Tage zwischen den Berechnungszeitpunkten wurden durch lineare Interpolation zwischen den FE-berechneten Verformungsänderungen ermittelt. Für diese Vorgehensweise wurde ein Zyklus von 25 Tagen, also ungefähr einmal monatlich, festgelegt, d. h. alle 25 Tage wurde die Verformungsänderung gegenüber dem Bezugstag, dem 01.01.2000 durch die strukturmechanische Analyse bestimmt. Nach diesem Prinzip wurde für alle Messstellen verfahren, vgl. Abb. 4.13 und Abb. 4.14.

Die Ergebnisse des Vergleichs zwischen den gemessenen und berechneten Verformungsänderungen sind in den Abb. 6.18 bis Abb. 6.25 dargestellt. Die FEM-Berechnungen basieren auf den durch die Sensitivitätsstudien ermittelten Parametern. In den Diagrammen aus Abb. 6.18 bis Abb. 6.23 werden die gemessenen Neigungsänderungen mit den FE-berechneten Neigungsänderungen über die Zeit von etwa zweieinhalb Jahren verglichen. Die gemessenen Neigungsänderungen können durch das erstellte Simulationsmodell mit den aufgebrachten Einwirkungsdifferenzen aus Temperatur und Stauhöhe sehr gut nachgewiesen werden. Bei dem Vergleich zwischen Messung und Berechnung fällt auf, dass die Abweichungen im Schacht 5/6 im Bogenmauerbereich am geringsten sind, vgl. Abb. 6.20 und Abb. 6.21. Diese Beobachtung lässt vermuten, dass die geringfügigen Abweichungen im Gewichtsmauerteil, die an allen betrachteten Positionen die gleiche Größenordnung aufweisen und auch zu den gleichen Zeitpunkten auftreten, auf die modellierte Fugenwirkung zurückzuführen ist. Diese Vermutung wird in Kap. 6.5.5 genauer analysiert.

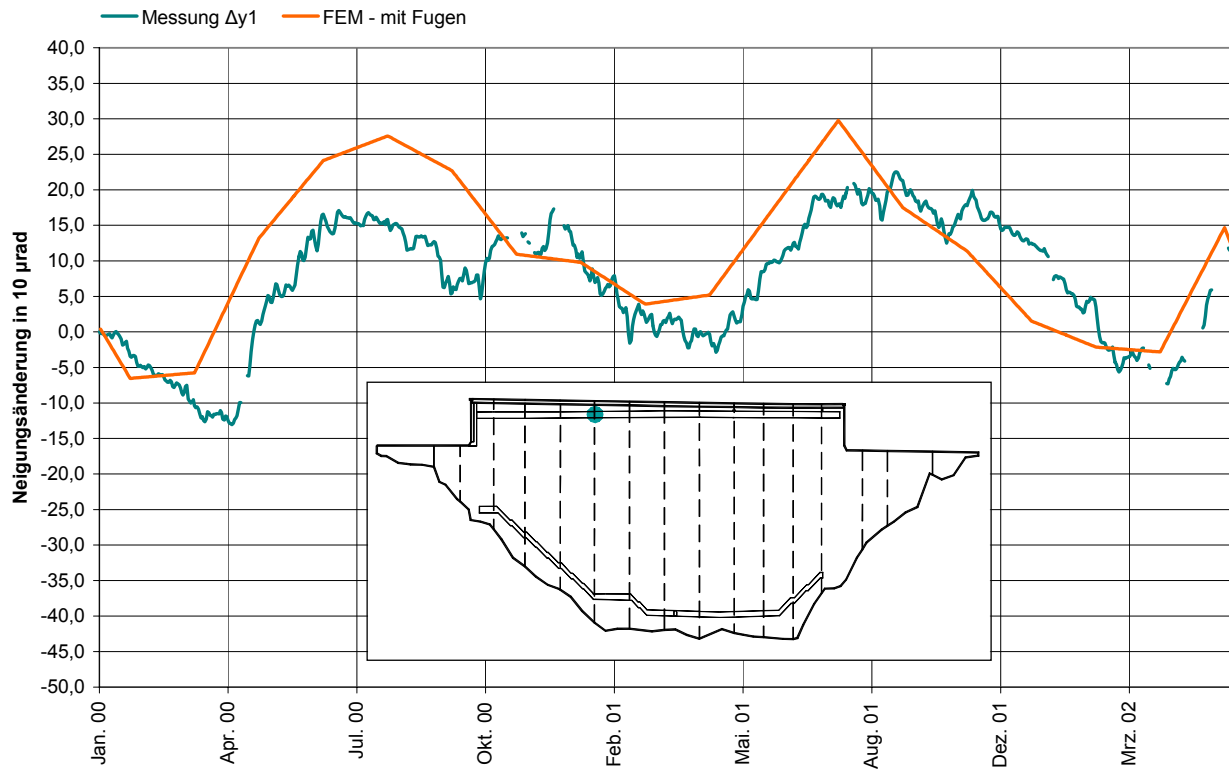


Abb. 6.18: Vergleich der gemessenen und berechneten Neigungsänderungen im oberen Kontrollgang der Staumauer an der Fuge 3/4

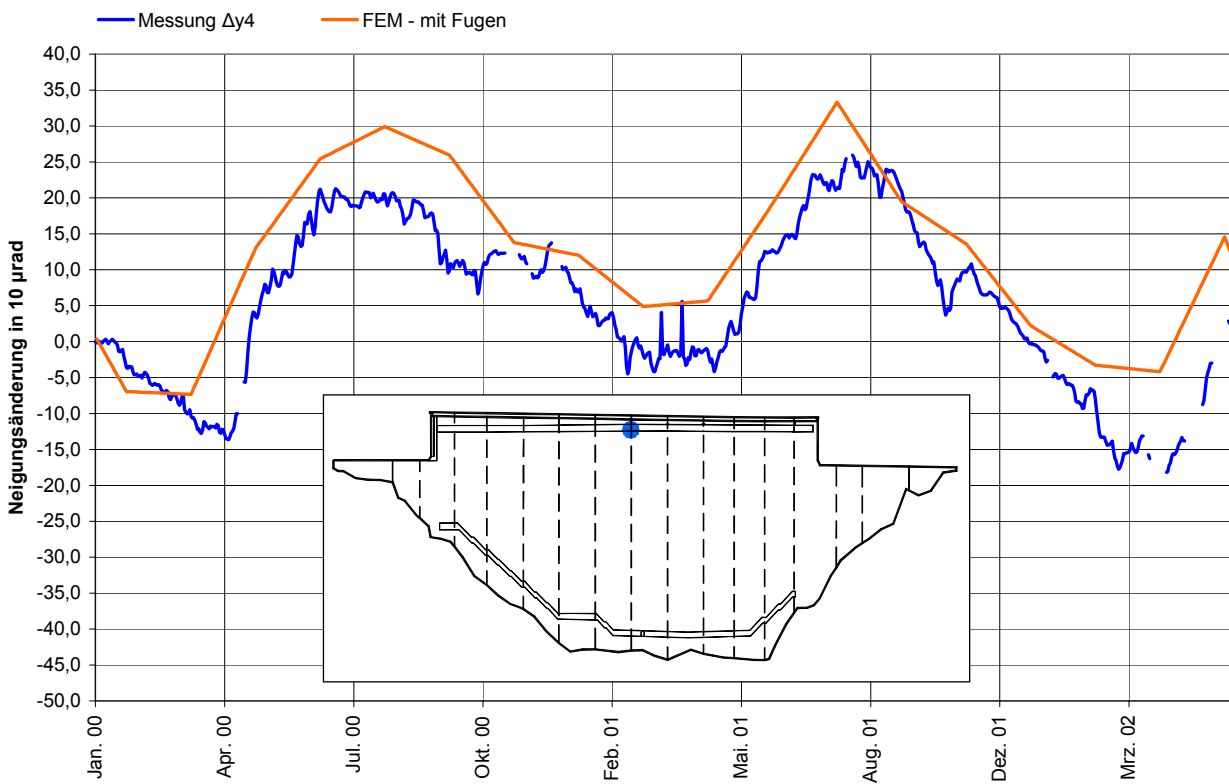


Abb. 6.19: Vergleich der gemessenen und berechneten Neigungsänderungen im oberen Kontrollgang der Staumauer an der Fuge 5/6

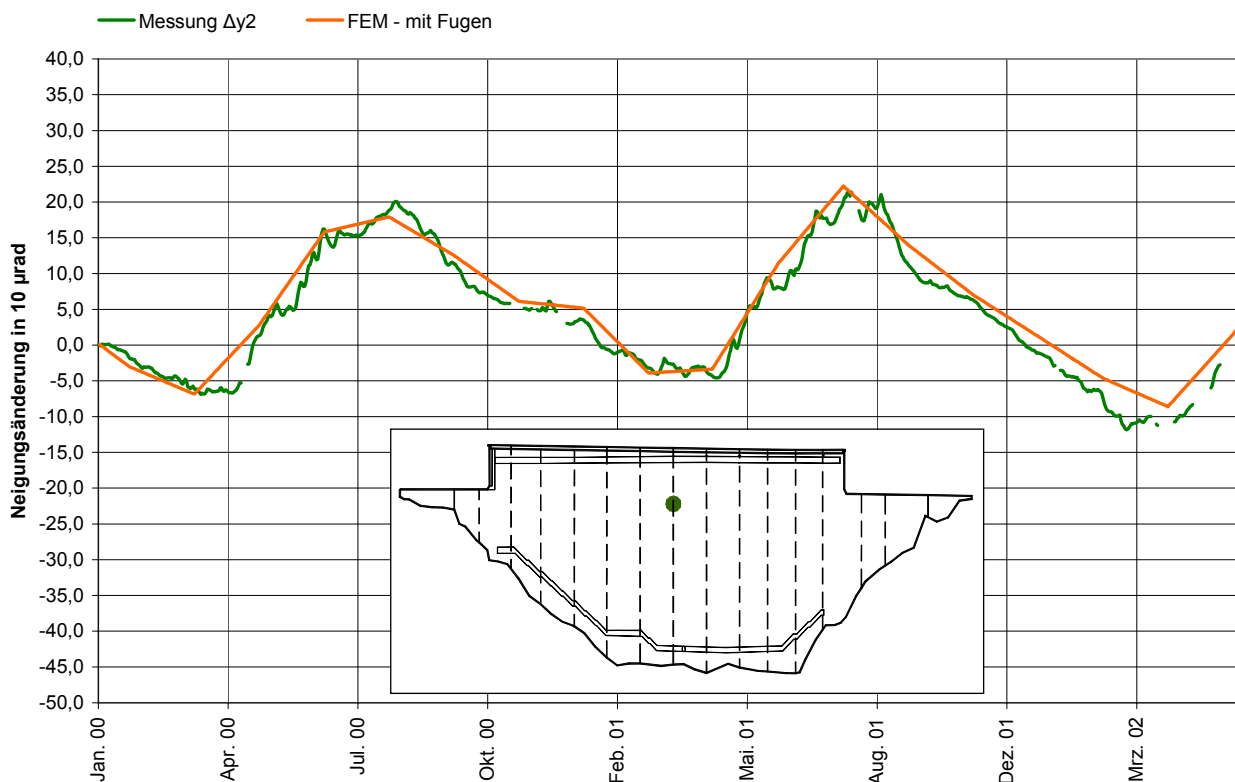


Abb. 6.20: Vergleich der gemessenen und berechneten Neigungsänderungen im Schacht 5/6 der Staumauer 16,80 m unter der Oberkante der Sohle des oberen Kontrollganges

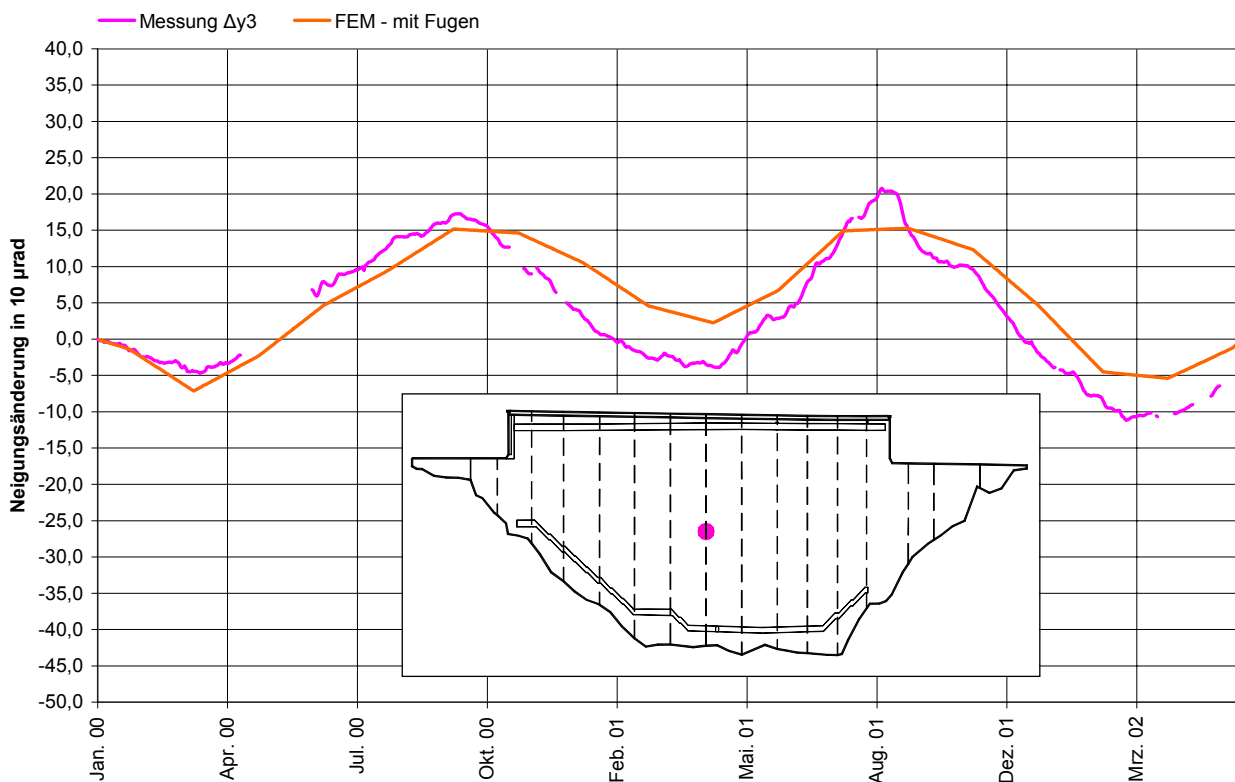


Abb. 6.21: Vergleich der gemessenen und berechneten Neigungsänderungen im Schacht 5/6 der Staumauer 34,40 m unter der Oberkante der Sohle des oberen Kontrollganges

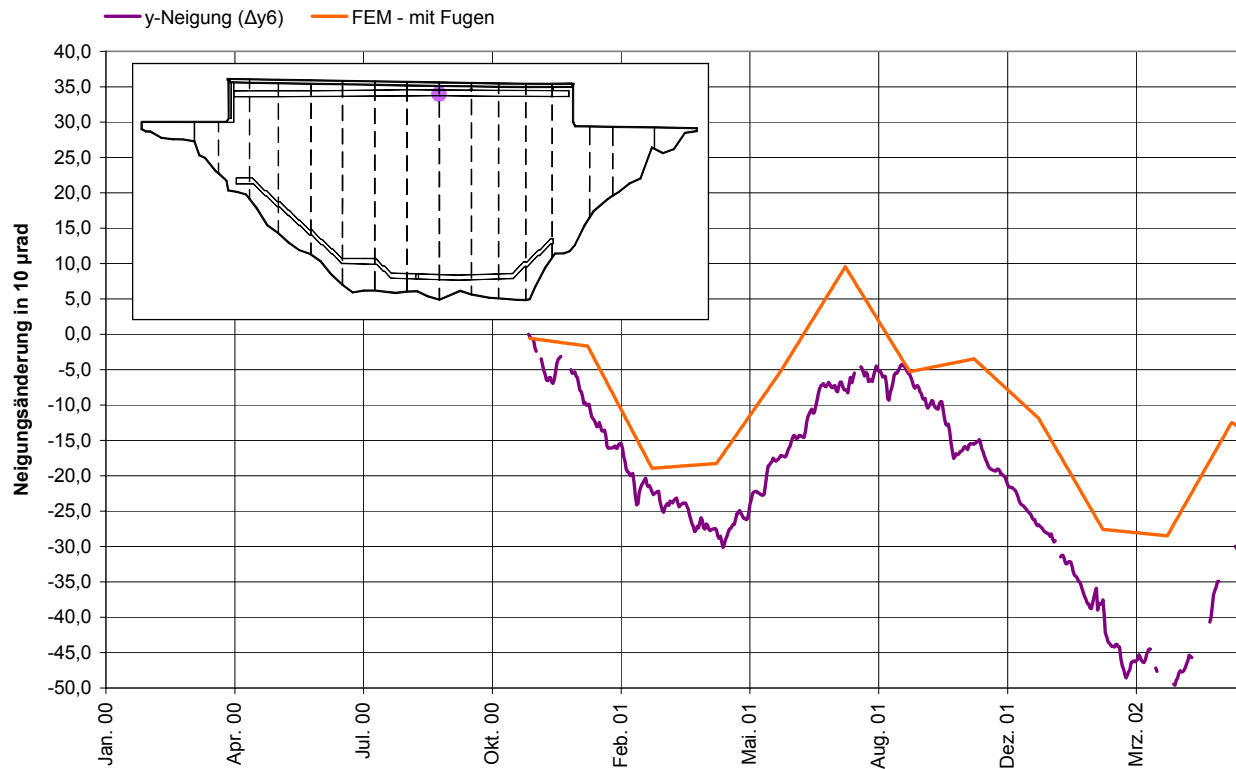


Abb. 6.22: Vergleich der gemessenen und berechneten Neigungsänderungen im oberen Kontrollgang der Staumauer an der Fuge 6/7

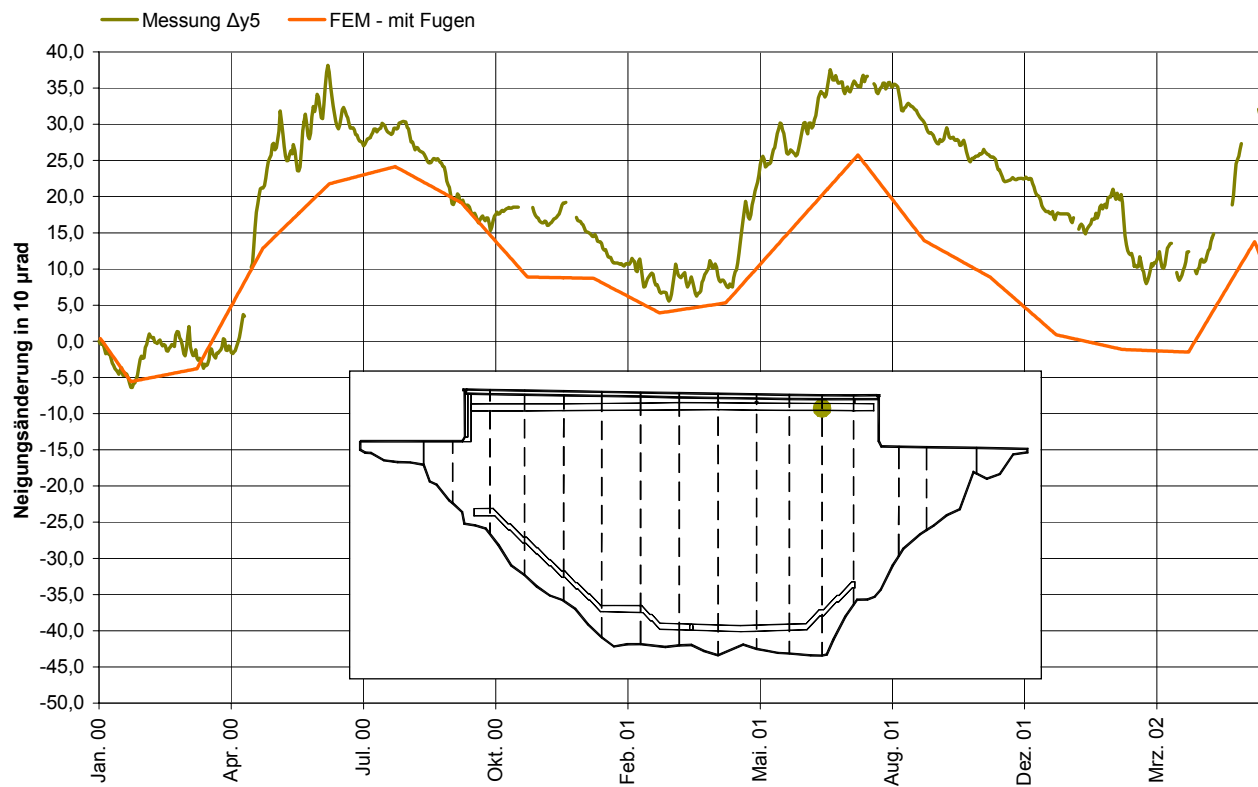


Abb. 6.23: Vergleich der gemessenen und berechneten Neigungsänderungen im oberen Kontrollgang der Staumauer an der Fuge 9/10

In Abb. 6.24 sind die Kronenverformungsänderungen aus der FEM-Berechnung, der Inklinometer-, Lot- und Neigungsmessung über den Verlauf von etwa zwei Jahren gegenübergestellt. Insgesamt zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung sowohl zwischen den verschiedenen Messverfahren als auch zwischen Messung und Berechnung. Die Abweichungen der Verformungsganglinien untereinander betragen maximal 5 bis 10 mm, dabei handelt es sich um die Größenordnung der Messgenauigkeit von einigen der Messverfahren, wie z. B. den Inklinometermessungen.

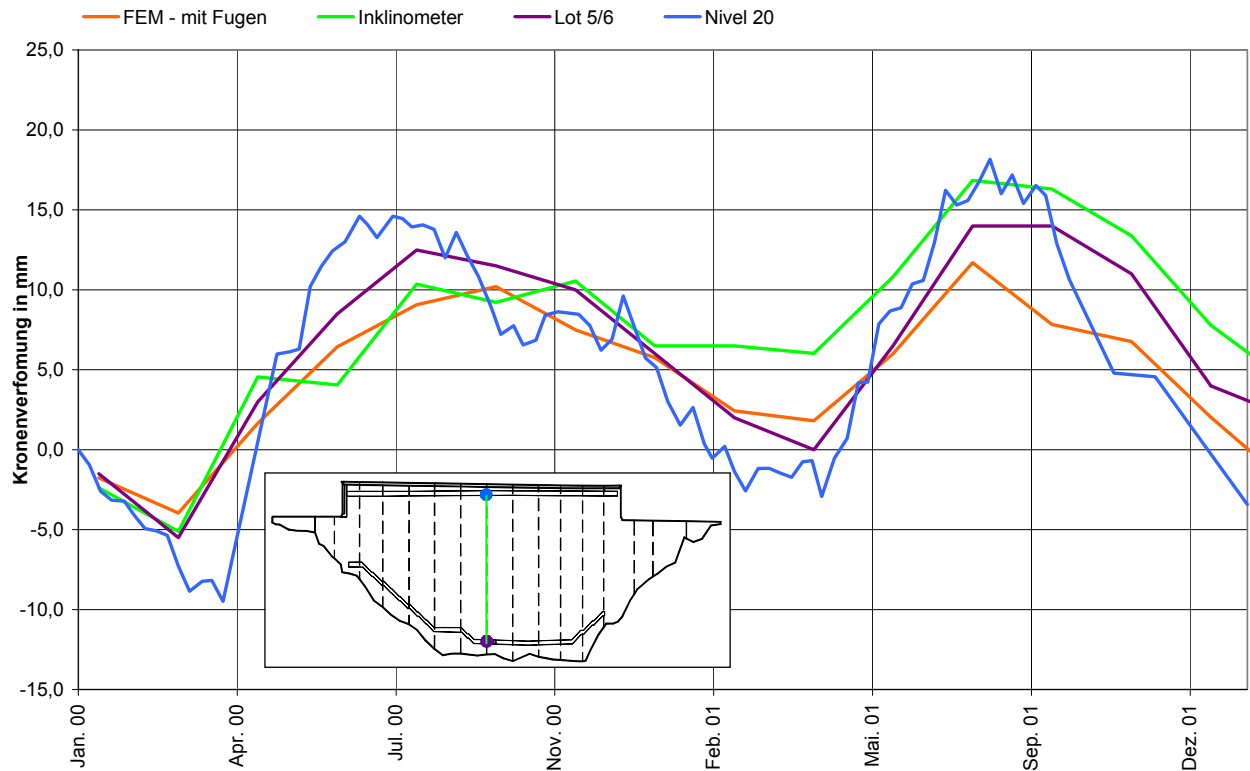


Abb. 6.24: Vergleich der mit verschiedenen Verfahren gemessenen und berechneten Kronenverformungen im oberen Kontrollgang der Staumauer an der Fuge 5/6

Abb. 6.25 zeigt den Vergleich der berechneten Verformungsänderungen entlang des Schachtes 5/6 mit den Inklinometermessungen und den Lotmessungen für zwei Tage bezogen auf den 01.01.2000. Die Beispiele wurden so gewählt, dass sowohl Verformungsänderungen zur Wasser- als auch zur Luftseite in Abb. 6.25 dargestellt sind. Die Verformungsberechnung liefert Verformungen an jeder Stelle des Bauwerks. Die Inklinometermessungen, vgl. Kap. 4.1.2.1.2 und Kap. 4.2.2, geben in Meterschritten die Neigungen entlang des Messrohres an, das sich im Schacht 5/6 befindet. Aus den Neigungen können dann die Verschiebungsdifferenzen berechnet werden. Die Lotmessung wird nur in Höhe des oberen Kontrollgangs gemessen und beträgt am Mauerfuß Null. Der Verlauf entlang des Schachtes 5/6 ergibt sich somit als Verbindung des Nullpunktes am Mauerfuß mit der Lotauslenkung in Höhe des oberen Kontrollgangs. Auch in dieser Ergebnisbetrachtung ist die Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung sehr gut.

Mit den durchgeführten Berechnungen ist es gelungen, das Verformungsverhalten der Staumauer im Betriebszustand numerisch nachzuvollziehen. Dabei konnte unter Einbeziehung der Messungen nachgewiesen werden, dass die Stauhöhen- und die Temperaturänderungen die größten Verformungsänderungen verursachen. Der alleinige Ansatz der Differenzen aus diesen

Einwirkungen hat sich somit als praxistauglich erwiesen. Bei Betrachtung der Verformungsänderungen zeigt sich, dass das Verhalten der Staumauer stark jahreszeitlich geprägt ist, vgl. Abb. 6.18 bis Abb. 6.24.

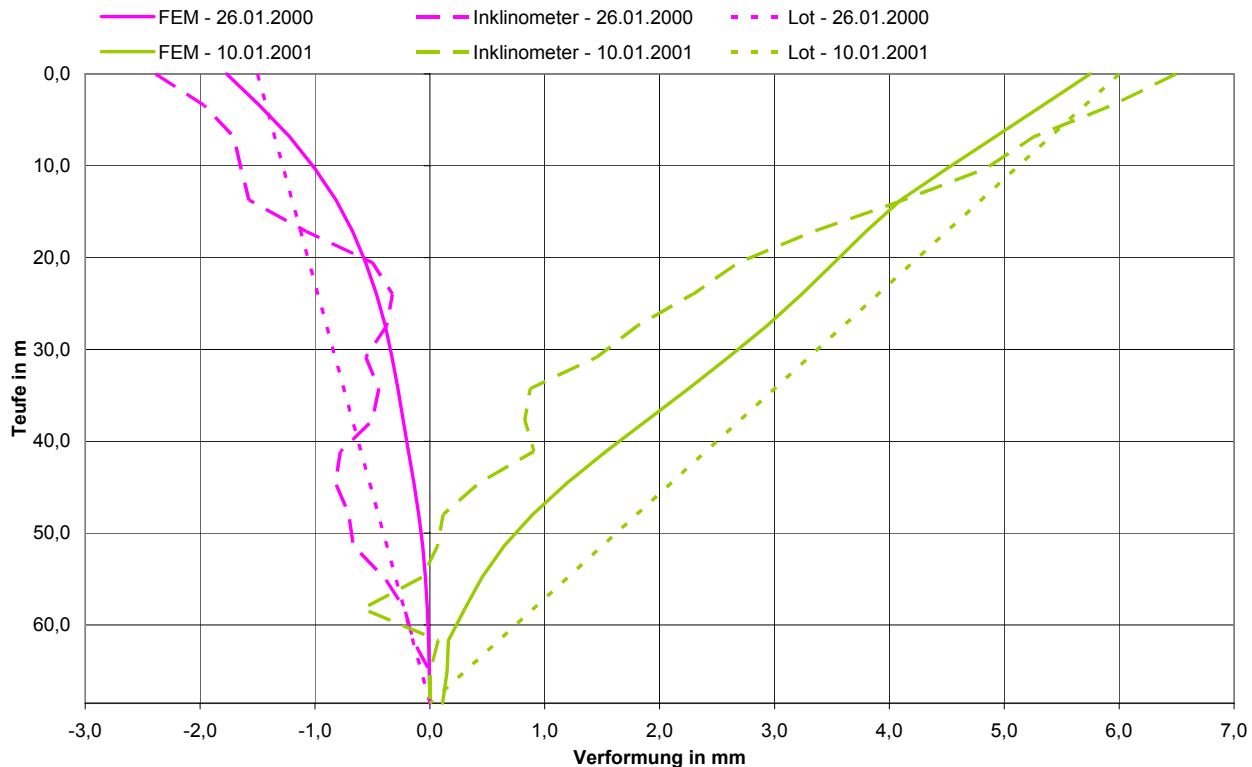


Abb. 6.25: Vergleich der mit verschiedenen Verfahren gemessenen und berechneten Verformungsänderungen der Staumauer entlang der Fuge 5/6 am Beispiel von zwei Zeitpunkten

6.5.5 Einfluss der Fugenmodellierung

Aufgrund der Erkenntnisse aus Kap. 6.5.4 wurde der Einfluss der Fugenmodellierung untersucht. Es wird eine teilweise Bogenwirkung im Gewichtsmauerteil als Ursache für die, wenn auch geringen, Abweichungen zwischen Messung und Berechnung vermutet. Daher wurde das bestehende Modell geändert, indem die vorhandenen Fugen im Gewichtsmauerteil als kraftschlüssig geschlossen simuliert wurden. Die Staumauer ist damit als reine Bogenstaumauer modelliert, die jedoch im Bereich der oberen 13 m kein seitliches Widerlager aufweist. Durch diese Änderung des Tragverhaltens ändert sich auch das Netz sowie die Lage und Anzahl der Knoten geringfügig. Eine Verwendung der berechneten Knotentemperaturen aus der bereits durchgeführten transienten Temperaturfeldanalyse ist daher ausgeschlossen. Es wurde folglich für das veränderte Modell ohne Fugen im Gewichtsmauerbereich eine eigene transiente Temperaturfeldanalyse mit anschließender strukturelle mechanische Verformungsanalyse durchgeführt. Dazu wurden die am Modell mit Fugenausbildung ermittelten Parameter für die Berechnungen verwendet. Das prinzipielle Vorgehen und die Berechnungszeitpunkte sind identisch wie bei dem Modell mit der Fugenausbildung im Gewichtsmauerteil. In den Abb. 6.26 bis Abb. 6.31 sind die Ergebnisse des Staumauermodells ohne Fugenausbildung im Vergleich zu denen mit Fugenausbildung sowie die Messergebnisse über den Zeitraum von Anfang Januar 2000 bis Ende

Mai 2002 dargestellt. Aus den verschiedenen Verläufen ist zu erkennen, dass sich in der Realität ganz offensichtlich eine teilweise Bogenwirkung im Gewichtsmauerteil einstellt, beispielsweise, indem sich einzelne Blöcke gegeneinander abstützen. Durch eine genaue Betrachtung der Ergebnisse zu einzelnen ausgewählten Zeitpunkten konnte festgestellt werden, dass der Effekt der teilweisen Bogenwirkung im Gewichtsmauerteil nicht auftritt, wenn ausschließlich Einwirkungen aus Temperaturunterschieden auftreten oder die Stauhöhenunterschiede sehr gering sind. Ferner konnte das Auftreten der teilweisen Bogenwirkung auf die Fälle eingegrenzt werden, in denen die Stauhöhe bis in den Gewichtsmauerteil reicht. Auf die Verformungen in der Bogenmauer hat die Ausbildung der Fugen im Gewichtsmauerteil nahezu keinen Einfluss, wie die Abb. 6.28 und Abb. 6.29, in denen die Verformungsänderungen im Schacht 5/6 aufgetragen sind, zeigen.

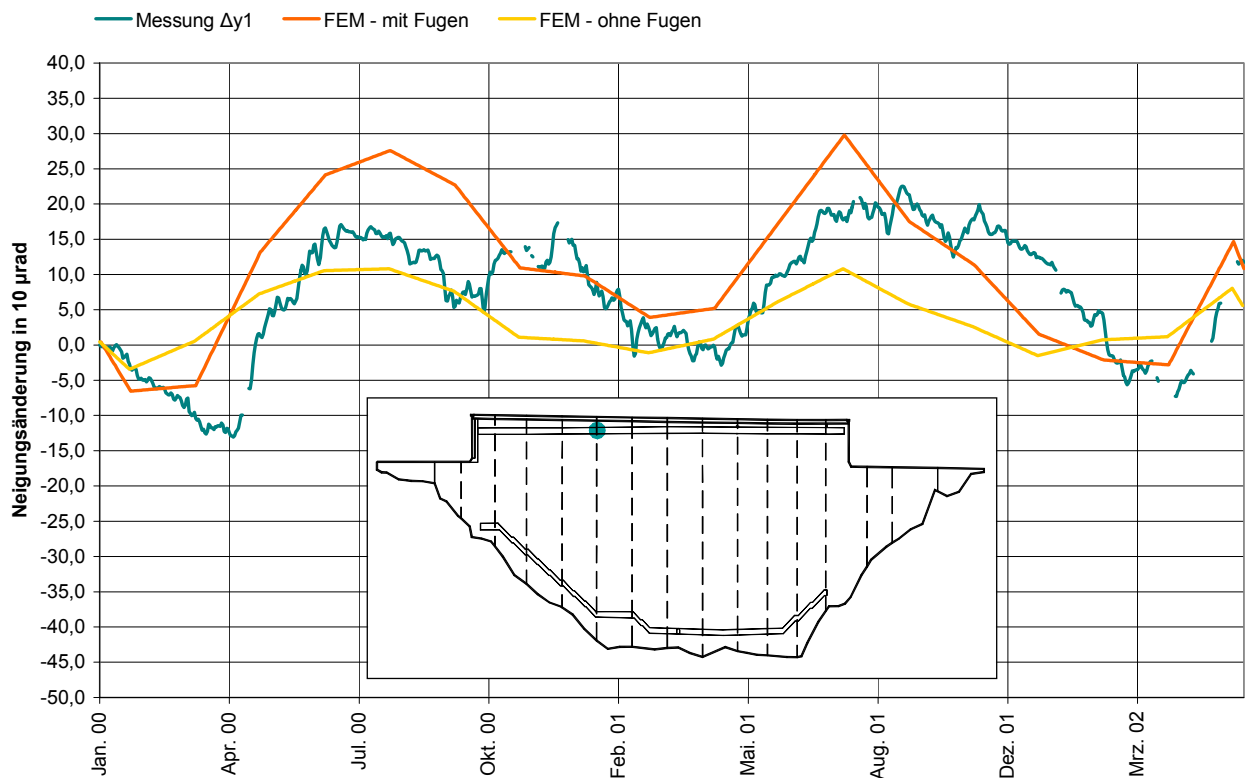


Abb. 6.26: Einfluss der Fugenausbildung im Gewichtsmauerteil in Höhe des oberen Kontrollgangs an der Fuge 3/4

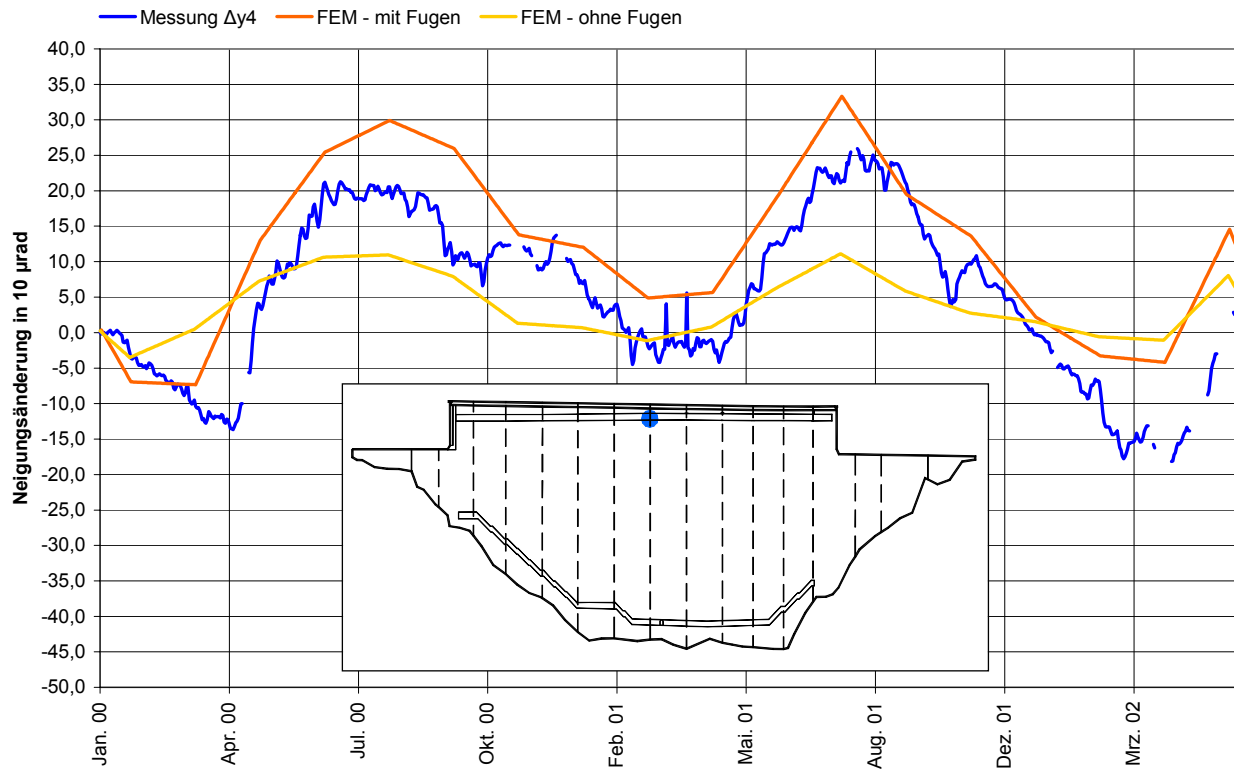


Abb. 6.27: Einfluss der Fugenausbildung im Gewichtsmauerteil in Höhe des oberen Kontrollgangs an der Fuge 5/6

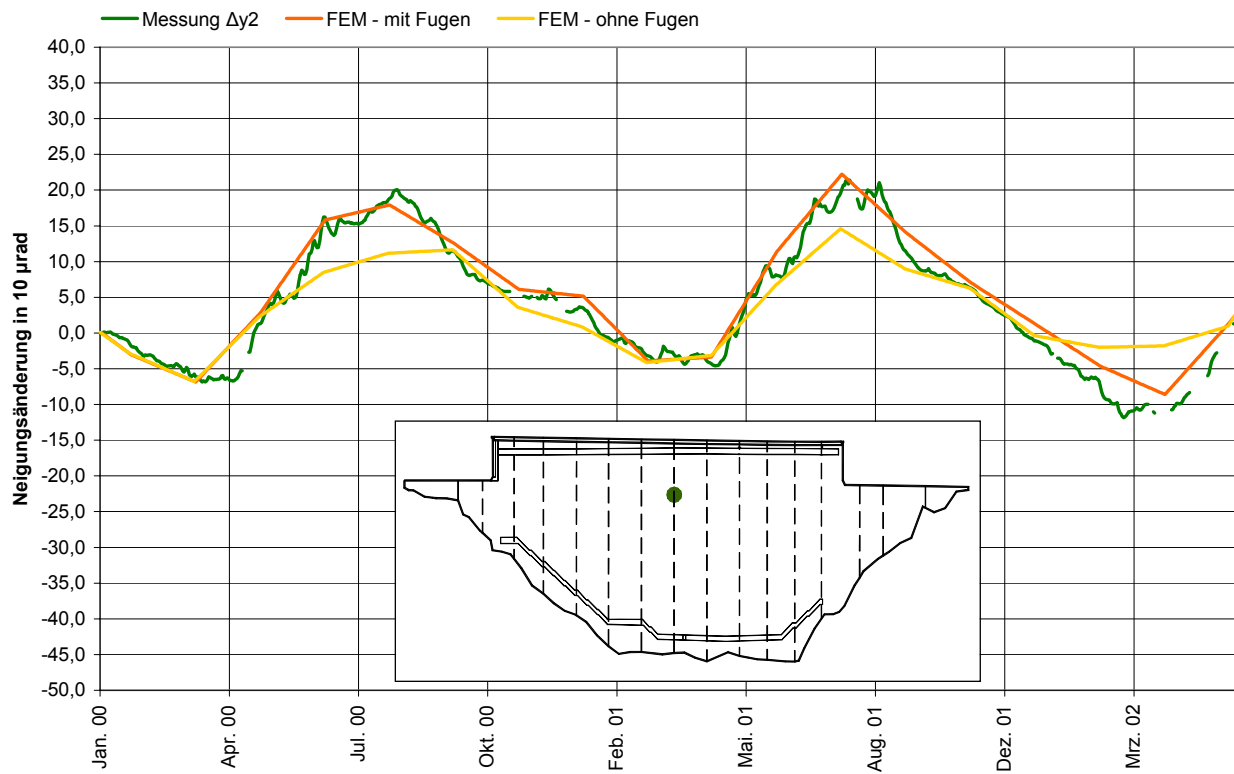


Abb. 6.28: Einfluss der Fugenausbildung im Schacht 5/6 der Staumauer 16,80 m unter der Oberkante der Sohle des oberen Kontrollganges

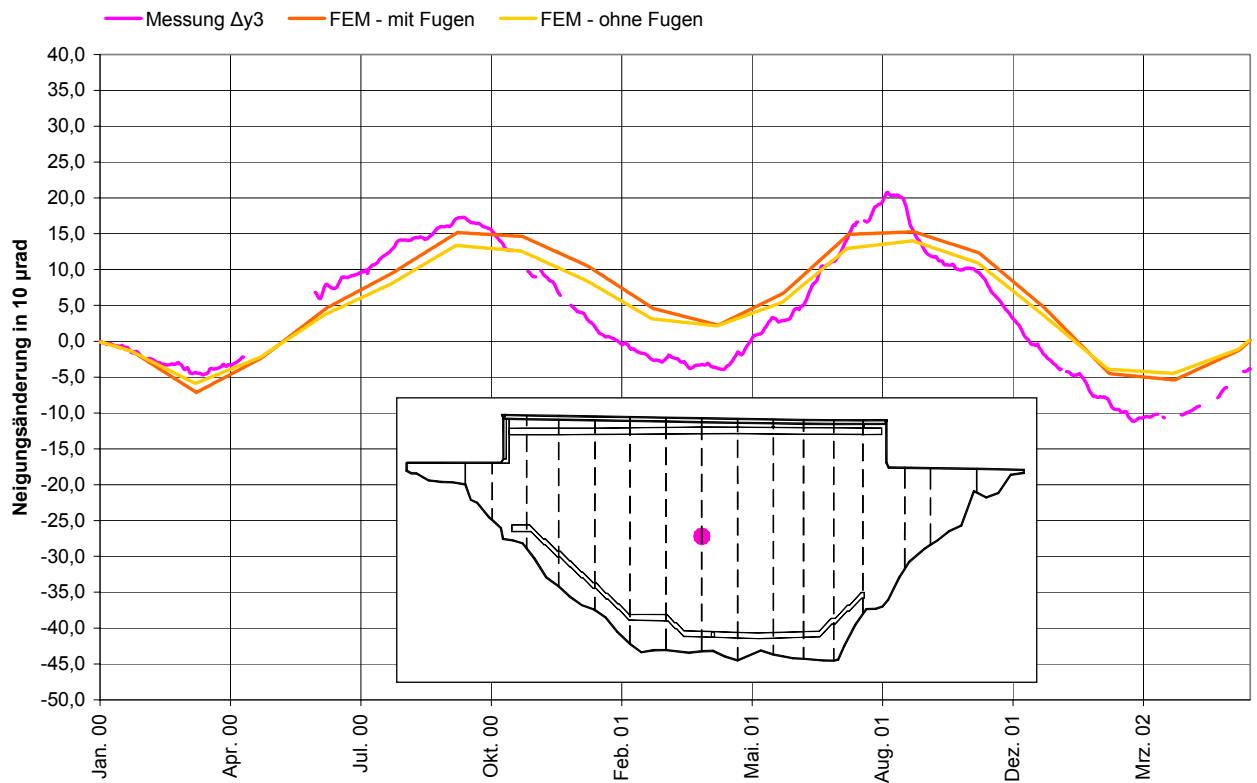


Abb. 6.29: Einfluss der Fugenausbildung im Schacht 5/6 der Staumauer 34,40 m unter der Oberkante der Sohle des oberen Kontrollganges

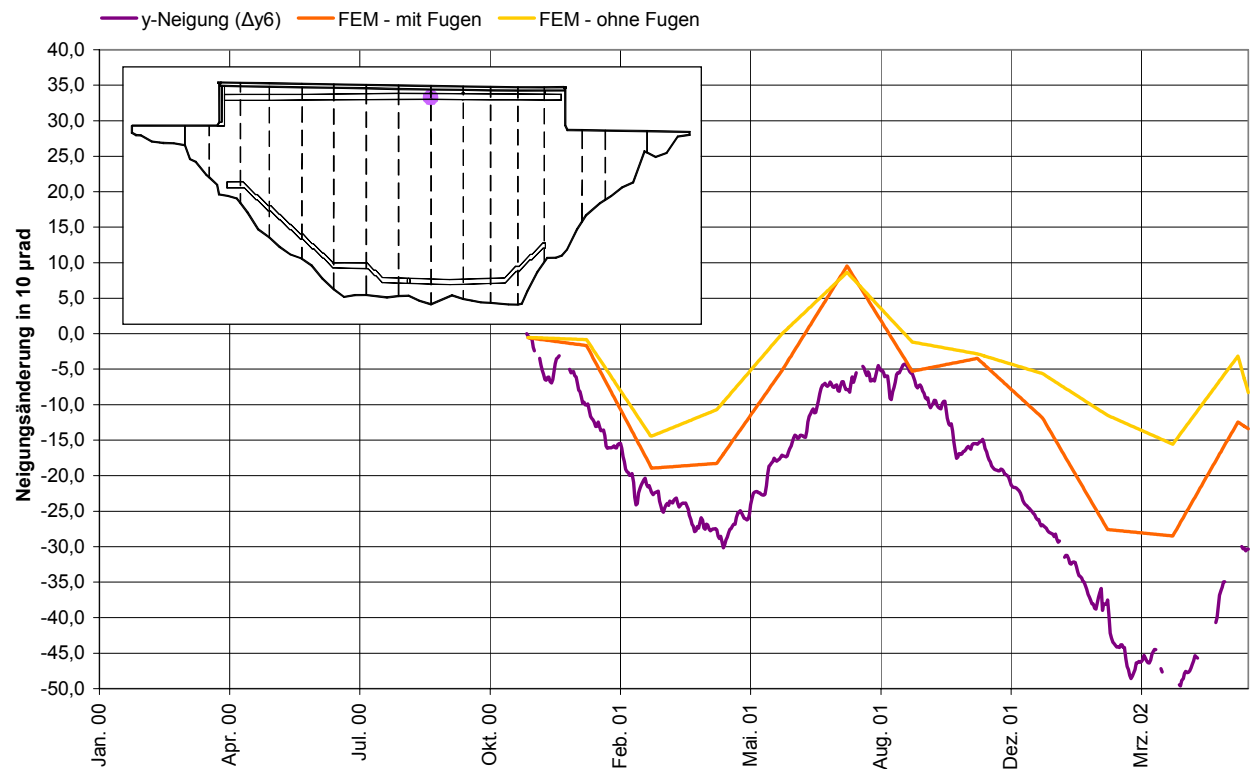


Abb. 6.30: Einfluss der Fugenausbildung im Gewichtsmauerteil in Höhe des oberen Kontrollganges an der Fuge 6/7

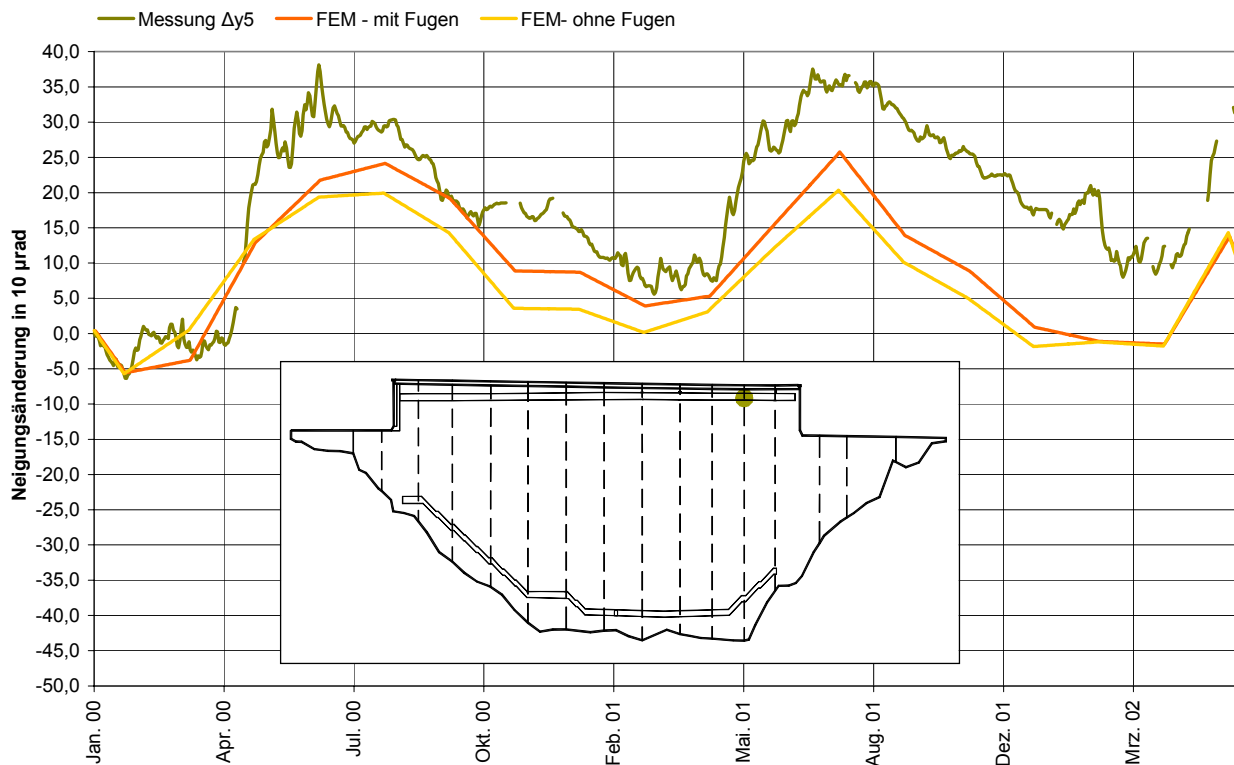


Abb. 6.31: Einfluss der Fugenausbildung im Gewichtsmauerteil in Höhe des oberen Kontrollgangs an der Fuge 9/10

6.6 Temperatur- und stauhöheninduzierte Verformungsanteile

Nachdem durch die Parameteroptimierung ein praxistaugliches Verformungs- und Prognosemodell für die Okerstaumauer erstellt wurde, mit dem die Qualität der berechneten Verformungen vergleichbar mit der Qualität der Messgenauigkeit der einzelnen Messverfahren ist, konnte auch die Zuordnung der Gesamtverformungsänderungen auf die stauhöhen- und temperaturinduzierten Anteile ermittelt werden. Dazu wurden zu den gleichen Berechnungspunkten, wie für die Nachrechnung der Messverläufe, zwei weitere strukturelle FE-Berechnungsläufe durchgeführt. In dem ersten Berechnungslauf wurden nur die Einwirkungen infolge der Stauhöhenänderungen aufgebracht, während im zweiten Berechnungslauf dementsprechend ausschließlich die Änderungen der Mauertemperatur berücksichtigt wurden. Die Summe der beiden Berechnungsläufe muss dann mit den zuvor durchgeführten Verformungsberechnungen für die kombinierte Einwirkung aus Stauhöhendifferenz und Mauertemperaturänderung identisch sein. Dieses wurde durch eine entsprechende Addition der Einzelergebnisse im Vergleich zur berechneten Gesamtverformungsänderung kontrolliert und bestätigt. Die Ergebnisse der anteiligen und kombinierten Verformungsberechnungen sind in Abb. 6.32 bis Abb. 6.34, am Beispiel des Schachtes 5/6 an den bereits bekannten Positionen in verschiedenen Höhen der Staumauer, dargestellt. Aus den Graphiken sind für die einzelnen Zeitpunkte jeweils der stauhöheninduzierte und temperaturinduzierte Anteil sowie die Gesamtverformungsänderungen zu entnehmen. Auch die Verformungsrichtungen der einzelnen Anteile und der Gesamtverformungsänderung sind abzulesen.

Der große Anteil der temperaturinduzierten Verformungsänderungen in Höhe des oberen Kontrollgangs ist in Abb. 6.32 sehr gut zu erkennen. Die temperaturinduzierten Verformungsanteile sind von etwa Mai/Juni bis September/Okttober besonders hoch, während im verbleibenden Jahreszeitraum die Verformungsanteile aus dem hydrostatischen Differenzdruck der Stauhöhenänderung überwiegen. In dem Zeitraum von etwa Mai/Juni bis September/Okttober sind auch die Betontemperaturen aus der transienten Temperaturfeldanalyse im Vergleich zu der Temperatur des Bezugszeitpunktes vom 01.01.2000 deutlich gestiegen. Aus diesem Grund sind die temperaturinduzierten relativen Verformungen im Sommer deutlich größer als im Winter. Die stauhöheninduzierten Verformungsanteile erreichen ihre Maximalwerte, wenn die Stauhöhe der Vergleichszeitpunkte nicht bis in die Höhe des Gewichtsmauerteils reicht.

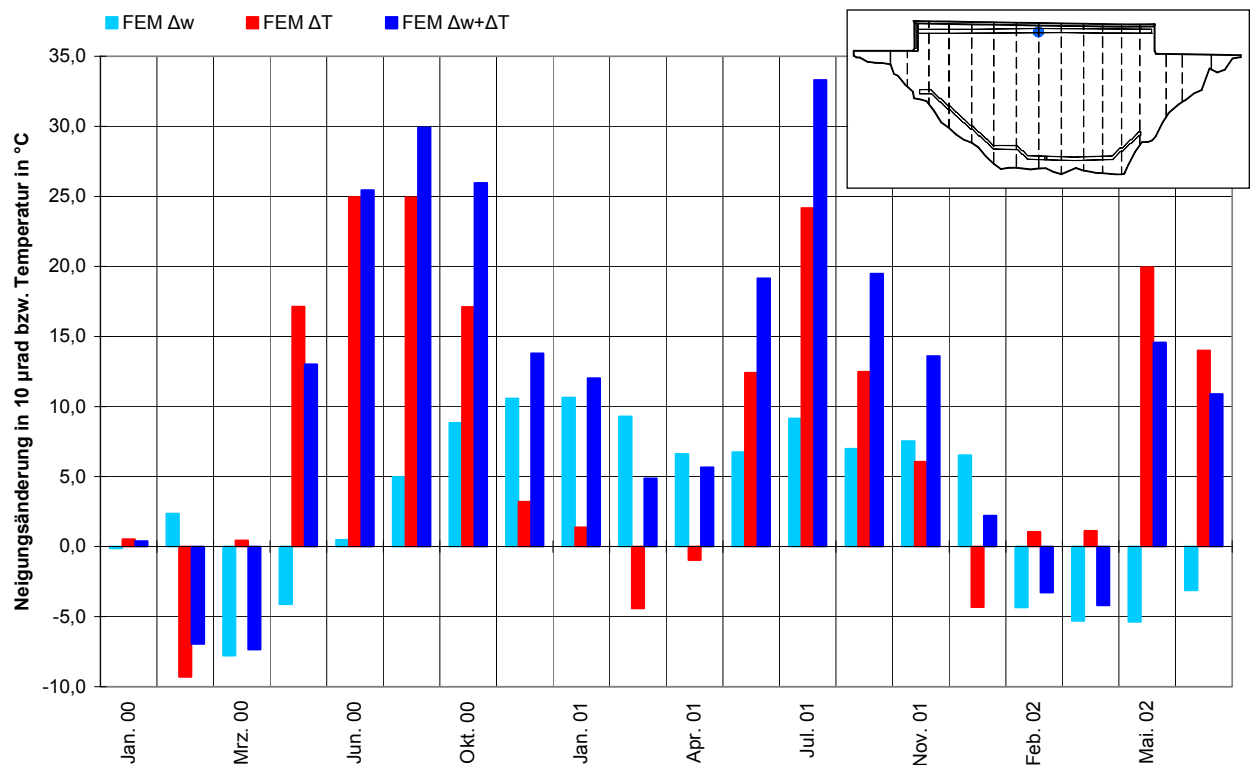


Abb. 6.32: Aufteilung der berechneten Neigungsänderungen in temperatur- und stauhöheninduzierte Anteile am Beispiel des Schachts 5/6 in Höhe des oberen Kontrollgangs

Die Aufteilung der Verformungsänderungen unterhalb des Übergangs des Gewichtsmauerteils zur Bogenmauer zeigt einen sehr ähnlichen Verlauf wie in Höhe des oberen Kontrollgangs in der Gewichtsmauer, vgl. Abb. 6.33. Die Beträge und teilweise auch die Verformungsrichtung unterscheiden sich, aber die Anteile an der Gesamtverformungsänderung sind vergleichbar.

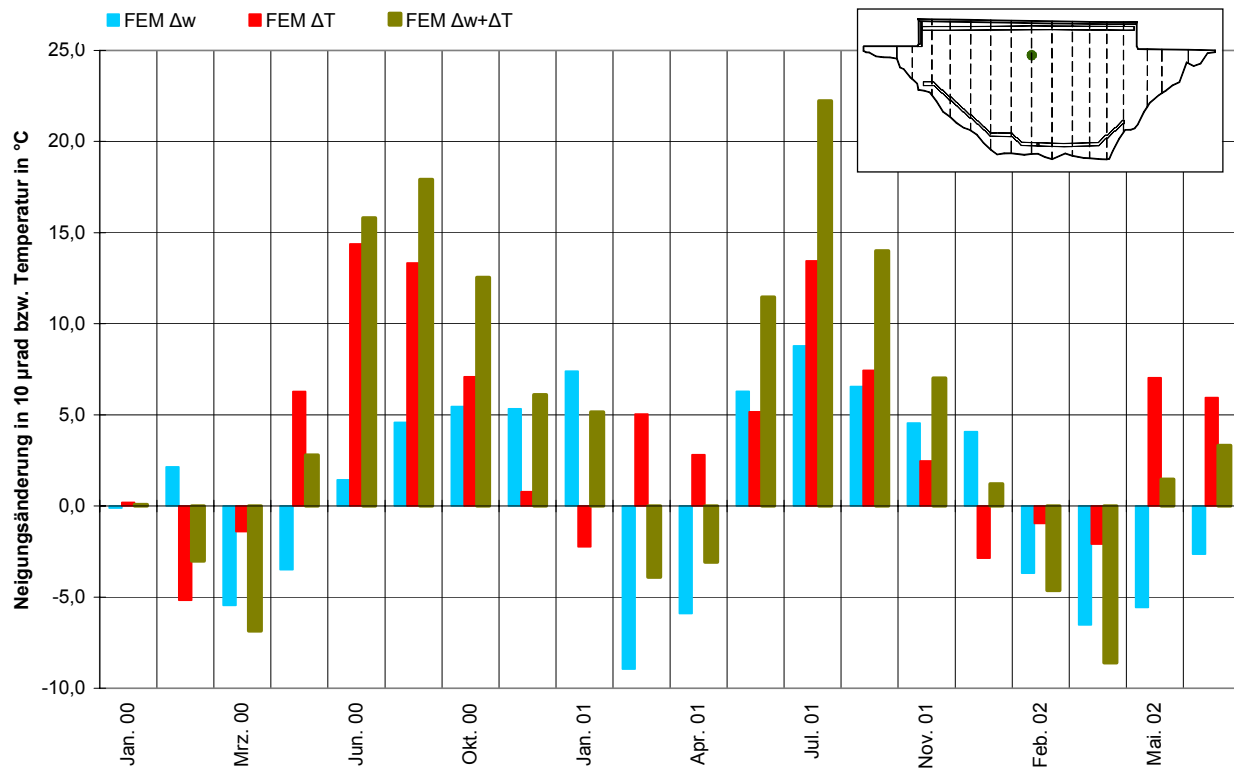


Abb. 6.33: Aufteilung der berechneten Neigungsänderungen in temperatur- und stauhöheninduzierte Anteile am Beispiel des Schachts 5/6 16,80 m unter der Oberkante der Sohle des oberen Kontrollganges

Im Gegensatz zu der bisherigen Zuordnung der einzelnen Verformungsanteile zeigt sich in mittlerer Höhe der Bogenmauer eine deutlich andere Aufteilung der Gesamtverformung. Abb. 6.34 belegt, dass der stauhöheninduzierte Verformungsanteil fast im gesamten Jahresverlauf überwiegt. Dies ist einfach zu erklären, denn der betrachtete Bereich liegt immer im Bereich der Stauhöhe, während beispielsweise die Stauhöhe nicht immer bis in die Höhe des oberen Kontrollganges reicht. Weiterhin erfährt dieser Bereich der Staumauer deutlich geringe Änderungen der Betontemperaturen als beispielsweise der Kronenbereich, da er immer im Bereich des Wasserstaus liegt und die Temperaturen damit intensiv durch die Wassertemperaturen bestimmt werden, die eine deutlich geringere Amplitude als die Lufttemperaturen aufweisen, vgl. Abb. 6.8. Infolge der geringeren Temperaturänderungen sind auch die temperaturinduzierten Verformungsanteile kleiner.

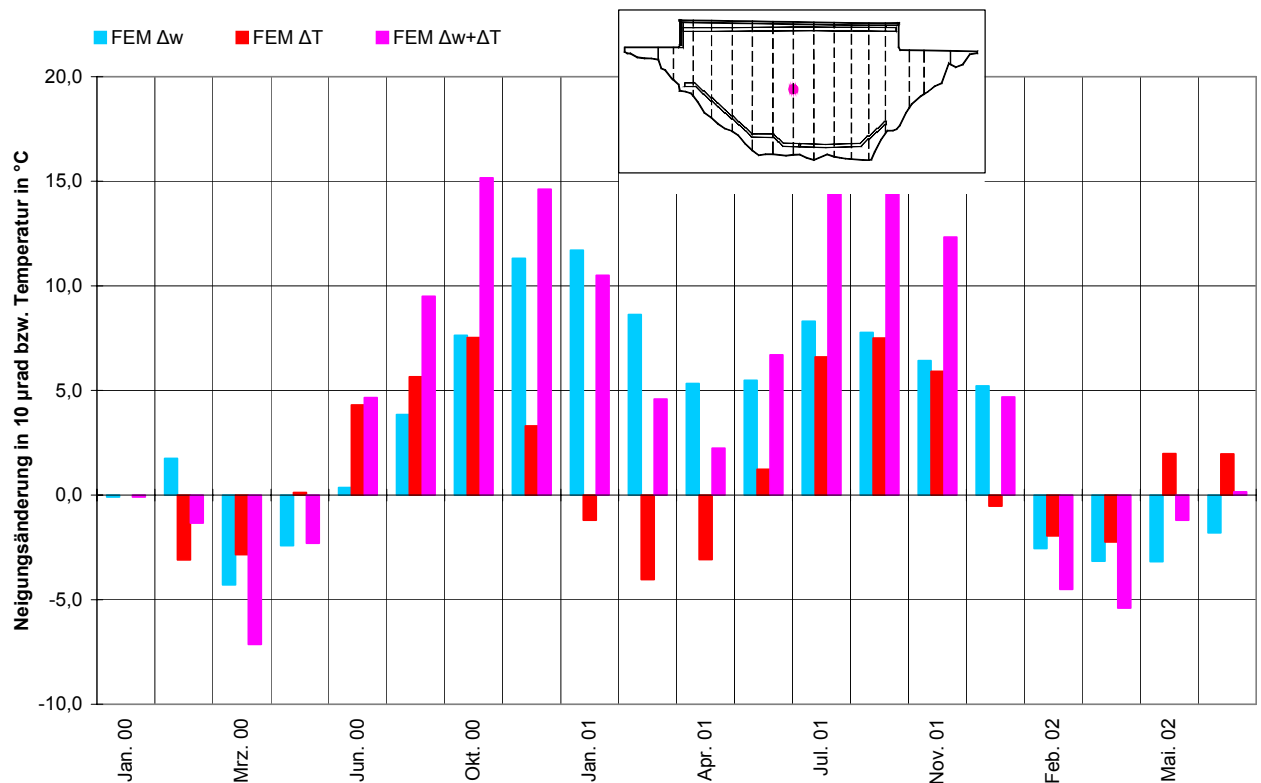


Abb. 6.34: Aufteilung der berechneten Neigungsänderungen in temperatur- und stauhöheninduzierte Anteile am Beispiel des Schachts 5/6 34,40 m unter der Oberkante der Sohle des oberen Kontrollganges

Das Temperaturverformungsverhalten von Staumauern wird primär durch die Temperaturdifferenz zwischen den Kernbereichen und den Außenbereichen der Staumauer bestimmt. Daher sind die Temperaturverhältnisse im Mauerinneren von entscheidender Bedeutung für Verformungsuntersuchungen. Die temperaturinduzierten Tagesgänge der Verformungen haben in den zuvor erläuterten Temperaturverteilungen im Mauerquerschnitt mit einer nahezu konstanten Kerntemperatur und den stark schwankenden Randbereichstemperaturen ihre Ursache. Die Randtemperaturbereiche zeigen eine große Amplitude, weil die stark schwankenden Lufttemperaturen eine große Angriffsfläche an der Maueroberfläche haben. Das Verformungsverhalten im Kronenbereich der Mauer wird durch die großen Temperaturschwankungen stark beeinflusst. Dagegen haben die Wassertemperaturen zwar primären Einfluss auf die Temperaturverteilung im Mauerinneren, aber geringere Auswirkungen auf das temperaturbedingte Verformungsverhalten von Betonstaumauern. Insbesondere in großen Tiefen sind, wie bereits erwähnt, die Amplituden sehr klein.

7 Schlussbetrachtung

In der vorliegenden Arbeit wurde das Verformungsverhalten des Hauptabsperrbauwerks der Okertalsperre, das als kombinierte Bogen-Gewichtsstaumauer konstruiert ist, unter Betriebsbedingungen untersucht. Dazu wurde durch die Verknüpfung von Messungen am bestehenden Bauwerk und einem zu diesem Zweck erstellten FE-Simulationsmodell mit sensitiven Parametern ein komplexes Analysemodell entwickelt. Mit den umfangreichen, teilweise kontinuierlich aufzeichnenden Messgeräten wurden einerseits die realen Umwelteinwirkungen und andererseits die daraus resultierenden Bauwerksreaktionen über einen Zeitraum von über drei Jahren erfasst.

Für die numerische Simulation war es erforderlich, zahlreiche, möglichst realitätsnahe Annahmen zu treffen, da die geometrischen Abmessungen nur aus Planungsunterlagen zu entnehmen sind. Es liegen zudem keine Verformungsmessungen infolge des Baus und des ersten Einstaus vor. Des Weiteren sind nur wenige Materialkennwerte des Staumauerbetons und des Untergrunds punktuell zum Zeitpunkt des Baus bekannt. Vor ca. 15 bis 20 Jahren wurden Untergrundinjektionen zur Verbesserung des anstehenden Untergrundes durchgeführt, über die keine Angaben zur Verfügung stehen. Zudem veränderten sich die Materialkennwerte im Laufe der vorliegenden fünf Jahrzehnte, so dass für die rechnerische Analyse der Temperaturverteilung und des Staumauerverformungsverhaltens die Materialkennwerte im ersten Schritt abgeschätzt werden mussten. Im Rahmen der durchgeführten Sensitivitätsstudien wurden diese Kennwerte angepasst. Ebenso wurden die Elementierung und der Ansatz der Lastaufbringung mit Parameterstudien im Hinblick auf das Berechnungsziel optimiert. Die zuvor beschriebenen Ausgangsbedingungen erforderten für die strukturelle Verformungsanalyse die Entwicklung eines geeigneten Berechnungsansatzes. Aufgrund der Gültigkeit des Hooke'schen Gesetzes, die nachgewiesen wurde, war es möglich, für die numerische Simulation nur die Differenzen der Einwirkungen zwischen zwei betrachteten Zeitpunkten anzusetzen. Durch diesen Berechnungsansatz konnte der Einfluss der einzelnen Parameter auf die Berechnungsergebnisse minimiert werden.

Als verformungsrelevante Einwirkungen haben sich die Stauhöhenänderungen und die Temperaturschwankungen herausgestellt. Während die Stauhöhenänderungen unmittelbar zu Staumauerverformungen führen, kann aus den Schwankungen der Umgebungstemperatur nicht direkt auf die daraus resultierenden Verformungen geschlossen werden. Verformungserzeugend sind die Mauertemperaturen bzw. die Änderungen derselben, die wiederum aufgrund der Schwankungen der Umgebungstemperaturen entstehen. Die Mauertemperaturen bilden sich aufgrund der großen Wärmekapazität von massiven Bauwerken erst zeitversetzt unter dem Einfluss der thermischen Belastungsgeschichte des Bauwerks aus. Als Basis für die rechnerische Simulation der temperaturinduzierten Verformungen wurde daher eine transiente Temperaturfeldanalyse für die Staumauer durchgeführt, welche die instationären, zeitabhängigen Prozesse in der Wärmebilanz berücksichtigt. Aus den berechneten Mauertemperaturen und den korrelierenden Stauhöhen wurden die Differenzen der Einwirkungen zwischen zwei betrachteten Zeitpunkten bestimmt. Diese Einwirkungsdifferenzen wurden auf das entwickelte strukturelle Verformungsmodell, das auf dem gleichen Geometriemodell wie das Wärmeflussmodell basiert, aufgebracht, um die aus den Einwirkungsdifferenzen resultierenden Verformungsänderungen zu berechnen.

Das entwickelte Analysemodell mit den ermittelten Arbeitswerten für die unbekannten Parameter wurde verwendet, um das Verformungsverhalten der Okerstaumauer detailliert zu analysieren. Die Verformungen konnten auf die temperatur- und stauhöheninduzierten Anteile aufgeschlüsselt, das Zusammenspiel der beiden Mauteile untersucht und der Einfluss der Fugenausbildung im Schwergewichtsmauerteil belegt werden. Es ist gelungen, sowohl den Temperaturverlauf im Mauerkörper in Abhängigkeit von der thermischen Belastungsgeschichte als auch das mechanische Verhalten des kompletten Bauwerks infolge der verschiedenen Einwirkungsgrößen numerisch über einen Zeitraum von etwa zweieinhalb Jahren zu simulieren. Damit liegt ein praxistaugliches Modell vor, das zum Verständnis der einzelnen Verformungseffekte der Staumauer beiträgt und auch in Zukunft zur Interpretation der Überwachungsmessung eingesetzt werden kann.

Die durchgeführten Untersuchungen an der Okerstaumauer haben zu den nachfolgend erläuterten Erkenntnissen geführt:

- Die Betontemperaturverteilung in der Staumauer wird von den Umgebungstemperaturen, Wasser-, Luft- und Felstemperatur, beeinflusst. Primär wird die Betontemperatur dabei von der Wassertemperatur bestimmt, weil die hohe Wärmekapazität von Wasser für eine ausgleichende, dämpfende Wirkung bei Temperaturschwankungen sorgt. Die Amplitude der Betontemperaturschwankungen klingt mit zunehmendem Abstand von der Betonoberfläche ab, somit unterliegt die Kerntemperatur der Staumauer nur sehr geringen Temperaturschwankungen. Die Betontemperaturen folgen dem Verlauf der Umgebungstemperaturen mit einer zeitlichen Verschiebung, die mit zunehmendem Abstand von der Oberfläche zunimmt: Die oberflächennahen Mauerbereiche erfahren die Temperaturänderungen fast zeitgleich mit den Umgebungstemperaturen, während die Kerntemperatur um etwa 50 Tage versetzt mit deutlich geringerer Amplitude dem Verlauf der Umgebungstemperatur folgt. Die Ergebnisse der transienten Temperaturfeldanalyse erlauben eine Quantifizierung des jahreszeitlichen Temperatureinflusses auf massive Staumauern. Daraus konnte für die gemäßigte Klimazone eine allgemeingültige, jahreszeitbedingte charakteristische Temperaturverteilung abgeleitet werden.
- Für die temperaturbedingten Verformungen der Staumauer sind die Lufttemperaturschwankungen aufgrund ihrer großen Amplitude und der großen Oberfläche, auf die sie wirken, maßgebend, denn das Temperaturverformungsverhalten wird vorrangig durch die Temperaturdifferenz zwischen den Kern- und den Außenbereichen der Staumauer bestimmt. Die Wassertemperaturen beeinflussen das Verformungsverhalten in geringerem Ausmaß, da die Amplituden besonders in größeren Tiefen sehr klein sind. Entsprechend ist der Einfluss der Untergrundtemperaturen, die nahezu konstant bleiben, zu vernachlässigen.
- Die Parameterstudie für die Wärmeleitfähigkeit bei der transienten Temperaturfeldanalyse zeigt einen geringen Einfluss des Wertes der Wärmeleitfähigkeit von weniger als 10% auf die berechneten Temperaturen, wenn realistische Werte für die Wärmeleitfähigkeit angesetzt werden. Dementsprechend sind auch Streuungen bei der Wärmeleitfähigkeit, beispielsweise durch feuchte Mauerbereiche oder natürliche Schwankungen in den Materialkennwerten vernachlässigbar. Der Arbeitswert von $3,5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ für die Wärmeleitfähigkeit führte zu den besten Übereinstimmungen zwischen den berechneten und den partiell sowie temporär gemessenen Betontemperaturen. Im Gegensatz zu der Wärmeleitfähigkeit ist der

möglichst exakte Ansatz des Initialzustands als Ausgangspunkt der transienten Temperaturfeldberechnung entscheidend für die Qualität der berechneten Betontemperaturen.

- Die im Betriebszustand der Staumauer auftretenden Spannungen und Dehnungen liegen in einem schmalen Bereich des Spannungs-Dehnungs-Diagramms. Daher darf für den Verformungsmodul ein Sekantenmodul aus dem Spannungs-Dehnungs-Diagramm und ein linear-elastisches Materialgesetz angesetzt werden. Damit gilt das Hooke'sche Gesetz und erlaubt die Berechnung von Differenzzuständen. Der gewählte Berechnungsansatz, die Einwirkungen nur als Differenzen zu simulieren, wird durch die Tatsache untermauert, dass bei der Differenzbildung der Ergebnisse aus zwei Berechnungen mit den tatsächlichen Einwirkungsgrößen der Fehler vergrößert wird.
- Bei Betrachtung der Spannungen und Dehnungen in der Staumauer wird die Größenordnung der angesetzten Verformungsmoduln bestätigt. Die durchgeführten Parameterstudien der Verformungsmoduln in der Strukturanalyse belegen, dass eine genauere Bestimmung dieser Materialkennwerte bei dem Ansatz der Einwirkungsdifferenzen von untergeordneter Bedeutung für die Analyseergebnisse ist. Die Auswirkungen bei Variation der Parameter in realistischen Grenzen weisen eine Abweichung der betrachteten Verformungen um weniger als 5% auf. Damit liegen die Verformungsunterschiede, die aus den verschiedenen Verformungsmoduln resultieren, in der gleichen Größenordnung wie die Messgenauigkeit der eingesetzten Neigungssensoren zur Verformungsmessung. Der V-Modul des Grobrüttelbetons wurde auf Basis der Parameterstudien mit einem Arbeitswert von 37.000 N/mm^2 bestimmt und stimmt damit mit dem V-Modul, der beim Bau der Staumauer durch Laboruntersuchungen ermittelt wurde, nahezu überein. Die V-Moduln des Untergrundes und des mit größerer Ausdehnung simulierten Widerlagerbereichs wurden auf Arbeitswerte von 24.000 N/mm^2 und 18.000 N/mm^2 eingegrenzt. Die Einflüsse der beiden zuletzt genannten V-Moduln auf die Ergebnisse der Verformungsberechnungen sind gegenüber dem Einfluss des V-Moduls des Talsperrenbetons gering. Dementsprechend sind die Streuungen bei den V-Moduln, die aufgrund der Inhomogenitäten des Untergrundes und des Staumauerbetons als natürliche Schwankungen in den Materialkennwerten auftreten, vernachlässigbar.
- Die Variation des Wärmeausdehnungskoeffizienten bei der Strukturanalyse hat im Vergleich zu den anderen betrachteten Parametern einen erheblichen Einfluss. Beim Ansatz von realistischen auf Literaturangaben basierenden Werten für den Wärmeausdehnungskoeffizienten weichen die berechneten Verformungsergebnisse bis zum Faktor 4 voneinander ab. Die Sensitivitätsstudie führt zur Festlegung des Wärmeausdehnungskoeffizienten von $\alpha = 5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Dieser Wert liegt in Nähe des unteren, in der Literatur dokumentierten Grenzwertes.
- Die Bogenstaumauer mit aufgesetzter Schwergewichtsmauer zeigt ein Verformungsverhalten, das von den Annahmen der statischen Berechnung abweicht. Bei der statischen Berechnung und der Bauausführung war eine Konstruktion vorgesehen, die im unteren Bereich der Mauer die Belastung über Bogenwirkung abträgt und im oberen Mauerteil das statische Tragverhalten einer Schwergewichtsmauer aufweist. Bei den durchgeführten Messungen und analytischen Untersuchungen wurde ein davon abweichendes Trag- und Verformungsverhalten unter Betriebsbedingungen festgestellt. Demnach weist die Schwergewichtsmauer bei Stauhöhenänderungen ein Verformungsverhalten auf, dass auf eine teil-

weise, jedoch keine vollständige Bogenwirkung schließen lässt. Die Erkenntnis wird durch eine Vergleichsberechnung, bei der alle Blöcke im Schwergewichtsmauerteil als kraftschlüssig verbunden simuliert wurden, belegt. Dieses Verhalten ist bei hohem Stauziel ausgeprägter als bei Stauzielen, die im Bogenmauerteil liegen. Bei temperaturinduzierten Verformungen ist dieses Verformungsverhalten nicht festzustellen.

In weiteren wissenschaftlichen Untersuchungen des Verformungsverhaltens könnte eine detailliertere Fugenmodellierung im Schwergewichtsmauerteil analysiert werden, die eine teilweise Bogenwirkung zeigt. So könnten einzelne Fugen im Schwergewichtsmauerteil geschlossen werden, ein eigenes fiktives Material und Materialgesetz für die Fugenausbildung herangezogen werden, das eine teilweise Bogenwirkung erlaubt oder die Fugen könnten in Form eines Kontaktproblems in der Finite-Elemente-Analyse simuliert werden. Voraussetzung für eine numerische Detailuntersuchung der Fugen im Gewichtsmauerteil wären jedoch umfassende Messungen der Fugenbewegung an jeder Fuge in der Gewichtsmauer über einen ausreichend langen Zeitraum, weil nur durch die Messung eine Aussage über das tatsächliche Verhalten jeder einzelnen Fuge getroffen werden kann. Erst wenn das Fugenverhalten durch Messungen bekannt ist, kann darauf basierend eine numerische Berechnung erfolgen. Grundlegend neue Erkenntnisse über das Verformungsverhalten der Staumauer sind durch diese Untersuchungen allerdings nicht zu erwarten.

- Der Vergleich zwischen den Mess- und Berechnungsergebnissen weist über den gesamten analysierten Zeitraum von zweieinhalb Jahren eine sehr gute Übereinstimmung auf. Diese konnte durch die umfangreichen Parameterstudien erzielt werden. Die verbleibenden, geringen Abweichungen zwischen Messung und Berechnung sind auf Mess- und Modellungenauigkeiten zurückzuführen.
- Die Untersuchungen belegen, dass zur korrekten Analyse des Verformungsverhaltens von Staumauern und vergleichbaren massiven Bauwerken ein deterministisches Modell in Kombination mit umfangreichen Messungen erforderlich ist. Eine Verformungsanalyse, die ausschließlich auf Messungen oder Berechnungen basiert, kann das Verformungsverhalten nicht korrekt und realitätsnah beschreiben. Ein FE-Modell trägt erheblich zum Verständnis der unterschiedlichen Verformungseffekte bei. Daher wird empfohlen, ein FE-Modell des betrachteten Bauwerks zu erstellen und anhand der daraus resultierenden Erkenntnisse über das Verformungsverhalten ein Messkonzept aufzustellen und zu betreiben. Die Messergebnisse ermöglichen im Vergleich mit dem FE-Modell eine Optimierung des Berechnungsmodells und des eingesetzten Messsystems. Von besonderer Bedeutung ist dabei der ausreichende und korrekt positionierte Einsatz von Temperatursensoren. Die Untersuchungen an der hier vorgestellten Bogenstaumauer mit aufgesetzter Schwergewichtsmauer belegen die Problematik der Messauswertung und rechnerischen Simulation des Verformungsverhaltens, wenn zu wenige Messungen über die Temperaturzustände vorliegen. Ohne die Kenntnis der Bauwerks- und Umgebungstemperaturen sind die Messergebnisse der Verformungsmessungen nur schwer bzw. teilweise gar nicht interpretierbar. Eine transiente Temperaturfeldanalyse ermöglicht es, diese Unzulänglichkeiten der Messungen teilweise zu kompensieren.

Insgesamt konnten die gestellten Fragen nach dem Verhalten der komplexen Staumauerkonstruktion unter Wasserdruck und Temperatureinfluss nachgewiesen und erklärt werden. Es konnte belegt werden, dass ein Messsystem, das aufgrund von unbeeinflussbaren Randbedingungen unvollständig ist, und eine Strukturanalyse, die von diversen unbekannten Parametern ausgeht, in der angewandten Kombination zu den gewünschten Erkenntnissen führt und realistische Aussagen ermöglicht. Das entstandene Analysewerkzeug kann auch auf andere Einwirkungskonstellationen erweitert werden.

Generell ist die in der Arbeit weiterentwickelte Methodik zur Verformungsanalyse, bei der Messungen und Strukturanalyse verknüpft werden, ein Beitrag zum Thema Bauwerksüberwachung und kann auch auf viele andere Bauwerke angewandt werden. Durch die Kombination der Verfahren kann eine gegenseitige Optimierung erfolgen. Basierend auf einem FE-Modell des betrachteten Bauwerks erfolgt eine verbesserte Positionierung der Messgeräte. Umgekehrt kann durch Einbeziehung der Messergebnisse das Berechnungsmodell mit seinen sensitiven Parametern verbessert werden. Sie kann bei entsprechender Planung vor Baubeginn zu einer besseren Materialausnutzung führen, wie dies auch in der Beobachtungsmethode gemäß DIN1054/2003 angestrebt ist.

Literaturverzeichnis

- [1] Aehnelt, G.; Gerbothe, D.: Rheologisches Verhalten der Gründung von Gewichtsstau-mauern. – Felsbau, 18 (2000); S. 42-47
- [2] Andersch, Franz: Der Talsperrenbau der Harzwasserwerke nach dem Kriege .- Wasser-wirtschaft, 1967; S. 6-9
- [3] ANSYS Inc.: Dokumentation und Hilfe in dem Programmsystem „ANSYS“, Online-Hilfe und Technischer Support; www.ansys.com
- [4] Armbruster-Veneti: Probleme und Fragestellungen bei der Überwachung und Kontrolle. - Bundesanstalt für Wasserbau; Karlsruhe; Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasser-bau, 1987
- [5] ATV-DVWK-Regelwerk: Berechnungsverfahren für Staudämme - Wechselwirkung zwi-schen Bauwerk und Untergrund. - Gemeinsames Merkblatt der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.; Merkblatt ATV-DVWK-M 502; Hennef; Druckpartner Moser, Rheinbach; 2002; ISBN 3-935669-44-5
- [6] Backhaus, Georg: Deformationsgesetze. - Hrsg.: Akademie-Verlag, Berlin; Berlin; 1983
- [7] Barth, Christian: Fehlerabschätzungen von Finite-Element-Lösungen; Stand und Perspek-tive aus der Sicht der Baupraxis. - Bauinformatik .- 6/1993; S. 264-271
- [8] Bassler, F.: Gesichtspunkte bei der Wahl einer Talsperren-Bauart. - Hrsg.: H. Press; Mit-teilungen aus dem Institut für Wasserbau (Wasserbaulaboratorium); Mitteilung Nr. 47.- Berlin; Selbstverlag; 1956
- [9] Bastian, Wilfried; Hass, Sören: Konzeptionelle Überlegungen zur Zuverlässigkeit von Staudämmen. - Wiss. Zeit. Hochsch. Archit. Bauwesen - Weimar. – 35/1989; S. 99-103
- [10] Bathe K.-J.; Walczak, J.; Welch, A.; Mistry, N.: Nonlinear analysis of concrete structures.- Hrsg.: Massachusetts Institute of Technology; Computers & Structures.- Cambridge; Maxwell Pergamon Macmillan plc; 1989; S. 563-590
- [11] Bathe, Klaus-Jürgen aus dem Englischen von Peter Zimmermann: Finite-Elemente-Methoden. - 2. vollständig neu bearbeitete und erweiterte Auflage; Berlin, Heidelberg; Springer-Verlag; 2002; ISBN 3-540-66806-3
- [12] Bettzieche, Volker: Erfahrungen bei der messtechnischen Überwachung von Talsperren. - Ruhrverband, Essen, 1997;
<http://www.geotechnik.rwth-aachen.de/staudambau/Bettzieche/bettzieche.html>
- [13] Bettzieche, Volker: Temperaturmessungen und -berechnungen am Beispiel einer alten Gewichtsstau-mauer. – Wasserwirtschaft, 87 (1997)

- [14] Bettzieche, Volker: Vertiefte Analyse von Messwerten der Talsperrenüberwachung. - Hrsg.: Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule Mittweida (FH); Workshop: Messtechnische Überwachung von Stauanlagen. - 1/2002; Mittweida; Hochschule Mittweida; 2002; S. 57-77; ISSN 1437-7624
- [15] Bettzieche, Volker; Döring, Heinz: Temperaturmessung in einer Staumauer mittels Glasfaserkabel; Essen, 2000;
<http://www.geotechnik.rwth-aachen.de/staudambau/Bettzieche/bettzieche.html>
- [16] Blaser, Frank; Hage, Willi H.: Maßstabeffekte und Frontentwicklung an Talsperrenbruchmodellen. - Hrsg.: TU Dresden; Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen, Heft 13; Hydraulische und numerische Modelle im Wasserbau, Entwicklung - Perspektiven. - Dresden; 1998; S. 117-126; ISBN 3-86005-201-2
- [17] Blind, Hans : Wasserbauten aus Beton. - Berlin; Ernst & Sohn; 1987, ISBN 3-433-01009-9
- [18] Blind, Hans: Sicherheit von Talsperren. – Wasserwirtschaft, 72 (1982); S. 84-90
- [19] Bösing, E; Huber, G.; Schwarz, W.: Fehleranalyse bei Neigungssondierungen. - Messtechnik im Erd- und Grundbau: Symposium Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau. - 1983; S. 153-156
- [20] Bosshard, E.: Beiträge zur Theorie und Berechnung der Bogenstaumauern. - Hrsg.: Die Eidgenössische Technische Hochschule in Zürich; Promotionsarbeit. - Zürich; Dissertationsdruckerei Leemann AG; 1949
- [21] Bremen, R.; Bianchi, M.: Möglichkeiten und Grenzen deterministischer Modelle zur Überwachung von Verformungen an Betonsperren. – Bauinstandsetzen und Baudenkmalpflege, 3/2001, S. 271-284
- [22] Britz, U.; Eling, D.; Fahland, S.: Statistische und strukturmechanische Auswertungen von Überwachungsmessungen an Talsperren. - Hrsg.: DVW e.V.- Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement; Interdisziplinäre Messaufgaben im Bauwesen. - Heft 43; Stuttgart; Wittwer Verlag; 2002; S. 151; ISBN 3-87919-279-0
- [23] Bronstein, I.N.; Semendjajew, K. A.: Taschenbuch der Mathematik. – Verlag Harry Deutsch, Thun und Frankfurt/Main; 19. Auflage, 1980, ISBN 3871444928
- [24] Bundesamt für Wasser und Geologie BWG: Sicherheit und Risiken von Stauanlagen. - <http://www.bwg.admin.ch/themen/sperren> (17.10.2002); 2002
- [25] Bundesamt für Wasser und Geologie (BWG); Stauanlagen in der Schweiz. - <http://www.bwg.admin.ch/themen/sperren/d/> (17.10.2002); 2002
- [26] CADFEM: Schulungsunterlagen zu dem Programmsystem „ANSYS“ und technischer Support; www.cadfem.de
- [27] Crause, Christoph; Eling, Dirk: Entwicklung eines Datenvisualisierungs- und Analyseprogramms für die Überwachungsmessungen der Okertalsperre im Harz. - Hrsg.: Geodätisches Institut - Universität Hannover; Diplomarbeit; Hannover; 2001

- [28] Cronmann, Siegfried: Betrachtungen zur Zuverlässigkeit im Talsperrenbau. - Wiss. Zeit. Hochsch. Archit. Bauwesen - B. - Weimar. - 1989; S. 83-87
- [29] Dahlgrün, Fritz: Geologisches Gutachten über die geplante Okertalsperre. - Hrsg.: Institut für Geologie und Paläontologie; Clausthal; 1952; S. 22
- [30] Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK): Berechnungsverfahren für Gewichtsstaumauern, Wechselwirkungen zwischen Bauwerk und Untergrund - Merkblätter zur Wasserwirtschaft 242. - Bonn; Gas und Wasser mbH; 1996; ISBN 3-89554-038-2
- [31] Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK): Mess- und Kontroll-einrichtungen zur Überprüfung der Standsicherheit von Staumauern und Staudämmen. - DVWK Merkblätter. - Band 222; Hamburg; Verlag Paul Parey; 1991; ISBN 3-490-32297-5
- [32] Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK): Sicherheitsbericht Talsperren - Leitfaden. - DVWK Merkblätter. - Band 231; Bonn; Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH; 1995; ISBN 3-89554-026-9
- [33] Die Entwicklung der Talsperre. - <http://www.ch138.thinkquest.hostcenter.ch> (17.10.2002); 2002
- [34] Die verschiedenen Arten von Talsperren. - <http://www.ch138.thinkquest.hostcenter.ch> (17.10.2002); 2002
- [35] Deutsches Institut für Normung e. V.: Software; Entwicklung, Dokumentation, Qualität - Normen. - Informationstechnik, DIN-Taschenbuch 166, DIN 66230.- 4. Auflage; Berlin, Wien, Zürich; Beuth Verlag GmbH; 1995
- [36] Deutsches Institut für Normung e.V.; Stauanlagen – Gemeinsame Festlegungen; E DIN 19700 Teil 10. - Beuth Verlag GmbH; August 2001
- [37] Deutsches Institut für Normung e.V.; Stauanlagen – Talsperren; E DIN 19700 Teil 11. - Beuth Verlag GmbH; August 2001
- [38] Deutsches Institut für Normung e.V.; Wasserwesen: Begriffe, Normen, DIN-Taschenbuch 211, DIN 4048. - 1. Auflage; Berlin, Köln, Beuth; Beuth Bauverlag; 1986; ISBN 3-410-11909 (Beuth), ISBN 3-7625-2349-5
- [39] Deutsches Institut für Normung e.V.; Wasserbau 1: Stauanlagen, Stahlwasserbau, Wasserkraftanlagen, Wasserbauwerke, Schöpfwerke; DIN-Taschenbuch 179, DIN 19700 und DIN 19702.- 4. Auflage; Berlin Wien Zürich; Beuth Verlag GmbH; 1998; ISBN 3-410-14256-8
- [40] Dornack, S.; Horlacher, H.-B.: Hydraulische Modellversuche für die Heberanlage der Okertalsperre. - Hrsg.: TU Dresden; Wasserbaukolloquium 7. - 9.10.1998; Wasserbauliche Mitteilungen; Hydraulische und numerische Modelle im Wasserbau, Entwicklung - Perspektiven. - Heft 13; Dresden; 1998; S. 225-234

- [41] Dornstädter, Jürgen : Temperaturmessungen im Wasserbau - Möglichkeiten und Grenzen.- Hrsg.: Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule Mittweida (FH); Workshop: Messtechnische Überwachung von Stauanlagen. - 1/2002; Mittweida; Hochschule Mittweida; 2002; S. 123-134; ISSN1437-7624
- [42] Fabeck, R.: Untersuchung des Verformungsverhaltens der Okertalsperre mit Finiten-Elementen unter Berücksichtigung der konstruktiven Besonderheiten im Schwerkheitsmauerteil, Studienarbeit am Institut für Geotechnik und Markscheidewesen, TU Clausthal, unveröffentlicht, 2004
- [43] Fahland, S.; Grill, H.: Erfassung des Verformungsverhaltens der Okertalsperre durch ein ferngesteuertes Messsystem. - Hrsg.: Institut für Grundbau und Bodenmechanik; Technische Universität Braunschweig; Messen in der Geotechnik 2000.- Heft 62; Braunschweig; Institut für Grundbau und Bodenmechanik; TU Braunschweig; 2000; S. 277-309; ISBN 3-927 610-53-4
- [44] Fahland, S.: Ermittlung von Belastungen auf Grundbauwerke aus gemessenen Verformungen und Bewegungen, Diplomarbeit am Institut für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig, unveröffentlicht, 1997
- [45] Fankhauser, Andreas: Auswertung der Kontrollmessungen von Talsperren. - Hrsg.: Schweizerisches Talsperrenkomitee, Fachtagung 2002 - Chur; Messeinrichtungen, Messtechnik und Messdatenauswertung für die Überwachung der Stauanlagen. - Chur; <http://www.swissdams.ch/Committee/Dossiers/Chur> (17.10.2002); 2002
- [46] Feist, Christian : Lineare FE-Berechnung des Verformungsverhaltens von Gewölbemauern am Beispiel der Schlegeissperre. - Hrsg.: Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, Fakultät für Bauingenieurwesen und Architektur; Diplomarbeit; Innsbruck; 1998
- [47] Feist, V.; Hofstetter, G.: Numerische Simulation des Verformungsverhaltens einer Talsperre. - Hrsg.: Institut für Festigkeitslehre der Universität Innsbruck, 1998
- [48] Fitzen, Hans-Peter; Schraven, Achim: Moderne geodätische Messtechniken - GPS - System zur permanenten Talsperrenüberwachung am Beispiel der Bever-Talsperre. - Wasserwirtschaft , 88 (1998); S. 379 - 385
- [49] Frank, Peter: Hrsg.: Deutsches Talsperrenkomitee; DAMS in Germany. - Düsseldorf; Verlag Glückauf GmbH; 2001; ISBN 3-7739-5957-5
- [50] Fuchs; Reuter, A.: Bauwerke des Verkehrswasserbaues, Stauanlagen. - Hrsg.: Ingenieurschule für Wasserwirtschaft; Wasserbau. - Magdeburg; 1970
- [51] Gabbert, Ulrich; Berger, Harald; Blanke, Günther; Wehner, Peter: Hrsg.: Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Fakultät für Maschinenbau; Automatische Steuerung der Modell- und Ergebnisqualität für Finite-Element-Systeme. - Magdeburg; 1995

- [52] Gell, K.: Der Einfluss der Sickerströmung im Untergrund auf die Berechnung der Spannungen und Verformungen von Bogenstaumauern. - Hrsg.: Wittke, W.; Veröffentlichungen des Institutes für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Verkehrswasserbau der RWTH Aachen, Heft 11.- Aachen; 1984; ISSN 0341-7956
- [53] Gerecke, W.: Stochasto- und strukturgeomechanische Aspekte zur Stabilitätsanalyse von Staumauern. - Wiss. Zeit. Hochsch. Archit. Bauwesen - Weimar – 35/1989; S. 88-91
- [54] GIF: Geotechnische Messgeräte. - Hrsg.: Geotechnisches Ingenieurbüro Prof. Fecker und Partner GmbH; 76258 Ettlingen; Ettlingen; 1996
- [55] Gilg, Bernhard: Die messtechnische Überwachung der Talsperren als Grundlage für spätere Sanierung und Erhöhungen. - Wiss. Zeit. Hochsch. Archit. Bauwesen – Weimar – 35/1989; S. 125-127
- [56] Glötzl: Baumesstechnik .- Hrsg.: Glötzl Gesellschaft für Baumesstechnik mbH; Forlenweg 11; 76287 Rheinstetten; 1999
- [57] Grabowski, R.J.; Kobryn, A.: Zur Bestimmung von Deformationen von Ingenieurprojekten. - AVN, 6/1998; S. 188-192
- [58] Grätsch, Thomas; Hartmann, Friedel: Zum Gleichgewicht bei Finiten Elementen. - Bau-technik, 1/2000; S. 30-36
- [59] Groth, Clemens; Müller, Günther: FEM für Praktiker. - Band 3: Temperaturfelder; 3. aktualisierte Auflage; Renningen; expert-verlag; 2000; ISBN 3-8169-1858-1
- [60] Grübl, Peter; Weigler, Helmut; Karl, Sieghart: Beton; Arten, Herstellung und Eigenschaften. - Hrsg.: Herbert Kupfer; Berlin; Ernst & Sohn; 2001; ISBN 3-443-01340-3
- [61] Gülal, Engin : Geodätische Überwachung einer Talsperre, eine Anwendung der KALMAN-Filtertechnik. - Wissenschaftliches Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover. - Band Nr. 224; Hannover; 1997; ISSN 0174-1454
- [62] Härig; Günther; Klausen: Technologie der Baustoffe; Heidelberg; C. F. Müller Verlag, Hüthig GmbH, Heidelberg; 1996; ISBN 3-7880-7576-7
- [63] Harzwasserwerke des Landes Niedersachsen: Lageplan: Mess- und Kontrolleinrichtungen (II 7.124 D); Längsschnitt: Mess- und Kontrolleinrichtungen (II 7.125 B); Draufsicht Hauptspermmauer u. Nebenanlagen (Ile 7.101B); Querschnitte der Hauptspermmauer (Ile 7.104 B und 7.105 B).- Hrsg.: Harzwasserwerke, Abteilung: Liegenschaften und Vermessung; Hildesheim; 1957
- [64] Harzwasserwerke des Landes Niedersachsen: speichern aufbereiten transportieren. - Hrsg.: Harzwasserwerke des Landes Niedersachsen; 1992; Braunschweig; pigge DRUCK + SERVICE
- [65] Heitfeld, K.-H.: Talsperren. - Lehrbuch der Hydrogeologie .- Band 5; Stuttgart; Gebrüder Borntraeger, Berlin; 1991; ISBN 3-443-01009-1

- [66] Herzog, M. : Der Einfluss der Blockfugen auf das Tragverhalten von Gewölbbestaumauern. – Bauingenieur, 63 (1988); S. 369-372
- [67] Herzog, M.: Die Baugrundverformung bei Gewölbbestaumauern. – Bautechnik, 11/1988; S. 376-380
- [68] Herzog, M.: Die jährliche Kronenbewegung von Gewölbbestaumauern. – Bautechnik, 3/1988; S. 73-79
- [69] Herzog, M.: Die Rissgefahr im Inneren von Bogenstaumauern. - Österreichische Wasserwirtschaft, 43/1991; S. 69-70
- [70] Herzog, M.: Die statische Wirkung des Dichtungsschleiers bei Talsperren / Parameterstudie des Tragverhaltens einer Gewölbbestaumauer. – Wasserwirtschaft, 80/1990; S. 29-31 und S. 312-324
- [71] Herzog, M.: Eine Checkliste zur Beurteilung der Sicherheit von alten und neuen Talsperren. – Bauingenieur, 4/1993; S. 477-481
- [72] Herzog, M.: Einfachste Erfassung des Torsionseinflusses auf die Lastaufteilung in Bogenstaumauern. - Österreichische Wasserwirtschaft, 7/8 (1993); S. 217-220
- [73] Herzog, M.: Elementare Talsperrenstatik : Mit 26 Zahlenbeispielen von ausgeführten Talsperren im Vergleich zum gemessenen Verhalten. - 1. Auflage; Düsseldorf; Werner Verlag GmbH & Co.KG; 1998; ISBN 3-8041-2070-9
- [74] Herzog, M.: Entwicklung der Talsperrenberechnung. – Bautechnik, 7/1993; S. 576-586
- [75] Herzog, M.: Entwicklung und gegenwärtiger Stand des Festigkeitsnachweises für Bogenstaumauern. - Österr. Ing. & Arch.-Zeitschrift. – 136/1991; S. 126-132
- [76] Herzog, M.: Meilensteine des Bauens von Bogenstaumauern. – Bautechnik, 1/1989; S. 73-80
- [77] Herzog, M.: Rasche Vorbemessung von Bogenstaumauern nach der Schalentheorie. - Österr. Ing. & Arch.-Zeitschrift. - 1995; S. 117
- [78] Herzog, M.: Tragfähigkeit von Bogenstaumauern. – Bautechnik, 12/2001; S. 866-871
- [79] Herzog, M.: Über die Berechnung beliebig geformter Gewölbbestaumauern nach der Schalentheorie. – Bautechnik, 8/1956; S. 268-273
- [80] Herzog, M.: Unerwartetes Verhalten großer Gewölbbestaumauern. – Wasserwirtschaft, 1987; S. 651-656
- [81] Herzog, M.: Verbesserte Näherungsberechnung von Bogenstaumauern nach Schalentheorie. - Bautechnik, 5/2004; S. 379-390
- [82] Herzog, M.: Vollständige Näherungsberechnung von Gewölbbestaumauern im Vergleich mit in-situ-Messungen. – Bautechnik, 5/1991; S. 160-172

- [83] Herzog, M.: Wann benötigen Gewölbestaumauern Umfangsfugen? – Bautechnik, 1987; S. 231-235
- [84] Herzog, M.: Zum Einfluss der Formgebung auf die Tragwirkung von Bogenstaumauern. - Bauingenieur, 1989; S. 103-107
- [85] Herzog, M.: Zutreffende Talsperrenbemessung mit einfachen Mitteln. - Österr. Ing. & Arch.-Zeitschrift, 1993; S. 16-26
- [86] Heunecke, Otto: Hrsg.: Wissenschaftliches Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover; Zur Identifikation und Verifikation von Deformationsprozessen mittels adaptiver KALMAN-Filterung (Hannoversches Filter).- Band Nr. 208; Hannover; 1995; ISSN 0174-1454
- [87] Hobst, Eduard: Methode der finiten Elemente im Stahlbetonbau. - Beton- und Stahlbetonbau, 10/2000; S. 572-583
- [88] Hoffmann, M.: Prüfung von FE-Berechnungen am Beispiel einer Gewichtsstaumauer. - Wasser & Boden, 1995; S. 65-69
- [89] Hoffmann, M.; Salveter, G.; Baumgarten, A.: Standsicherheitsberechnung von Gewichtsstaumauern nach der dreidimensionalen FE-Methode.- Wasser & Boden, 1995; S. 46-50
- [90] Hohberg, Jörg-Martin: Trennflächenformulierungen für die statische und dynamische Berechnung von Bogenstaumauern. - Hrsg.: Institut für Baustatik und Konstruktion, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich; Zürich; 1988
- [91] Horlacher, Hans-B.; Müller, U.; Standfuß, M.: Verformungsverhalten einer Gewichtsstaumauer. - Tagungsband des Symposiums Betrieb und Überwachung wasserbaulicher Anlagen, Graz. - Schriftenreihe zur Wasserwirtschaft, 34/2000; S.67-79
- [92] Horlacher, Hans-B.; Standfuß, Matthias; Müller, Uwe; Kittler, Jan : Neue Aspekte bei der Auswertung von Überwachungsmessungen an Betonstaumauern in Sachsen. - Hrsg.: Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule Mittweida (FH); Workshop: Messtechnische Überwachung von Stauanlagen. - 2002; 1/2002; Mittweida; Hochschule Mittweida; 2002; S. 79-90; ISSN 1437-7624
- [93] Huggenberger, A.U.: Talsperren-Messtechnik: Messverfahren, Instrumente und Apparate für die Prüfung der Bauwerke in Massenstein. – Berlin, Göttingen, Heidelberg; Springer-Verlag; 1951
- [94] Ingesand, H. : Einwirkungen und Untersuchungen hochgenauer elektronischer Neigungsmesssysteme für konstante Messungen. - München; 1985
- [95] Intze, Otto: Geschichte der Talsperren. - <http://www.hs-friedenshoehe.de/talsperr> (17.10.2002); 2002
- [96] Jäger, Werner: Ergebnisse und Erfahrungen mit sekundär-stat. Auswertungen von Messergebnissen der Talsperrenüberwachung als Grundlage von Verformungsanalysen. - Wiss. Zeit. Hochsch. Archit. Bauwesen. - Weimar. – 35/1989; S. 112-117

- [97] Jurecka, W.: Die Berechnung bogenförmiger Staumauern nach dem Lastaufteilungsverfahren. - Österreichische Bauzeitschrift. – 12/1949; S. 195-203
- [98] Kaczynski, Jürgen: Stauanlagen, Wasserkraftanlagen. - 2. überarbeitete Auflage; Düsseldorf; Werner-Verlag; 1994; ISBN 3-8041-4574-4
- [99] Knothe, K.; Wessels, H.: Finite Elemente; Eine Einführung für Ingenieure. - 3. Auflage; Springer Verlag; 1999; ISBN 3-540-64491-1
- [100] Lattermann, Eberhard: Wasserbau-Praxis; Gewässerkunde, Flussbau, Stauanlagen, Wasserkraftwerke. - Band 1; Hrsg.: BBB, Bauwerk - Basis - Bibliothek; Berlin; Bauwerk-Verlag; 1999; ISBN 393436912x
- [101] Leica AG: Neigungssensor Nivel 20.- Hrsg.: Leica AG; Photogrammetrie und Metrologie; CH-5035 Unterentfelden (Schweiz); Heerbrugg; 1997
- [102] Leuenberger, J.: Felsverformungen unter Talsperren .- Wasser, Energie, Luft , 4/1981; S. 62-64
- [103] Linse, D.: Berechnungsgrundlagen von Staumauern. – Talsperrensymposium München; 1978; Schriftenreihe des DVWK, Heft 43
- [104] Linse, D.: Die Gründungsfuge von Staumauern - Beanspruchung und konstruktive Ausbildung. – Wasserwirtschaft, 3/1984; S. 142-146
- [105] Linse, D.: Wechselwirkung zwischen Felswiderlager und Bogenstaumauer. - 4. Nat. Tagung über Felsmechanik, Aachen; 1980
- [106] Ludwig, Holger: Untersuchungen des Verformungsverhaltens der Talsperre Rauschenbach. - Hrsg.: Technische Universität Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen; Diplomarbeit. - Dresden; 2001
- [107] Mang, Herbert; Hofstetter, Günter: Festigkeitslehre. - Wien; Springer Verlag; 2000; ISBN 3-211-83419-2
- [108] Marte, Roman; Semprich, Stephan: Untersuchung zur Messgenauigkeit von Inklinometermessungen. – Bautechnik, 3/1998; S. 155-167
- [109] Mehlhorn, Gerhard : Der Ingenieurbau, Grundwissen : Baustatik, Baudynamik. - Berlin; Ernst & Sohn; 1995; ISBN 3-433-01571-6
- [110] Mehlhorn, Gerhard: Der Ingenieurbau, Grundwissen: Bemessung. - Berlin; Ernst & Sohn; 1998; ISBN 3-433-01575-9
- [111] Mehlhorn, Gerhard: Der Ingenieurbau, Grundwissen: Hydrotechnik, Geotechnik. - Berlin; Ernst & Sohn; 1995; ISBN 3-443-01568-6
- [112] Mehlhorn, Gerhard: Der Ingenieurbau, Grundwissen : Mathematik, Technische Mechanik. - Berlin; Ernst & Sohn; 1999; ISBN 3-433-01567-8

- [113] Mehlhorn, Gerhard: Der Ingenieurbau, Grundwissen : Rechnerorientierte Baumechanik. - Berlin; Ernst & Sohn; 1995; ISBN 3-433-01572-4
- [114] Mehlhorn, Gerhard: Der Ingenieurbau, Grundwissen : Tragwerkszuverlässigkeit, Einwirkungen. - Berlin; Ernst & Sohn; 1996; ISBN 3-433-0154-0
- [115] Mehlhorn, Gerhard: Der Ingenieurbau, Grundwissen : Werkstoffe, Elastizitätstheorie. - Berlin; Ernst & Sohn; 1996; ISBN 3-433-01570-8
- [116] Meißner, Udo; Wassermann, Klaus : Rechnerunterstützte Verfahren. - Hrsg.: Fortschritt-Berichte VDI; 4. FEM/CAD-Tagung Darmstadt; Erfahrungsaustausch und Technologietransfer im Bauwesen. - Darmstadt; ISBN 3-18-321420-2
- [117] Meyberg, K.; Vachenauer, P.: Höhere Mathematik 1 und 2. – Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York; 1990; ISBN 3-540-51798-7 und ISBN 3-540-52334-0
- [118] Müller, G. : Finite Elemente - Einführung in das Arbeiten mit Ansys an nachvollziehbaren Beispielen. - Heidelberg; Hüthig Verlag; ISBN 3-7785-1593-4
- [119] Müller, Günther; Groth, Clemens: FEM für Praktiker. - Band 1: Grundlagen; 5. aktualisierte Auflage; Renningen; expert-verlag; 2000; ISBN 3-8169-1857-3
- [120] Müller, L.: Das Kräftespiel im Untergrund von Talsperren. - Geologie und Bauwesen. - Salzburg; 1960; S. 142-151
- [121] Müller-Salzburg, Leopold : Theoretischer Teil: Felsbau über Tage 1. Teil. - Der Felsbau; Stuttgart; Ferdinand Enke Verlag; 1963; ISBN 3-432-84011-X
- [122] Müller-Salzburg, Leopold unter Mitarbeit von E. Fecker: Teil A: Felsbau über Tage, 2. Teil; Gründungen, Wasserkraftanlagen (1. Abschnitt); Stuttgart; Ferdinand Enke Verlag; 1995; ISBN 3-432-84021-7
- [123] Müller-Salzburg, Leopold unter Mitarbeit von E. Fecker: Teil B: Felsbau über Tage, 2. Teil; Wasserkraftanlagen (2. Abschnitt).- Der Felsbau. - Band 2.; Stuttgart; Ferdinand Enke Verlag; 1995; ISBN 3-432-98811-7
- [124] Nationales Komitee für Große Talsperren in der Bundesrepublik Deutschland (DNK); Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK): Talsperren in der Bundesrepublik Deutschland. - Berlin; Systemdruck GmbH; 1987; ISBN 3-926520-00-0
- [125] Natke, H.G.; Pelzer, H.; Müller, D. : Projekt : Wissensbasiertes System 'Messtechnik im Bauwesen'. - Endbericht; Hannover; 1995
- [126] Noetzli, F. A.: Über die Versuchs-Gewölbe-Staumauern am Stevenson Creek. - Schweizerische Bauzeitung, 2/1926; S. 13-16
- [127] Office of design and Construction Engineering and Research Center Denver: Design Criteria for Concrete Arch and Gravity Dams.- Band Engineering Monograph No. 19; Washington; U.S. Government Printing Office; 1977; Stock No. 024-003-00109-1

- [128] Parkus, H.: Zur Berechnung von Staumauern als Schalen. - Zeitschrift für angewandte Mathematik & Mechanik, 31/1951; S. 277-278
- [129] Pedro, Jose Oliveira: Designing and monitoring for safety.- Hrsg.: CISM Courses and Lectures no. 367, International Centre for Mechanical Sciences; Arch dams.- Udine, Italien; Springer Verlag; Wien, New York; 1999; ISBN 3- 211-83149-5
- [130] Plate, Erich J. : Statistik und angewandte Wahrscheinlichkeitslehre für Bauingenieure. - Berlin; Ernst & Sohn; 1993; ISBN 3-433-01073-0
- [131] Poisel, Reiner: Geometrische Rechenmodelle für Talsperrenwiderlager in geklüftetem Fels .- Felsbau, 1/1990; S. 17-23
- [132] Preß, H.: Gesichtspunkte bei der Wahl einer Talsperren-Bauart. - Hrsg.: TU-Berlin; Mitteilungen aus dem Institut für Wasserbau (Wasserbaulaboratorium) der Technischen Universität Berlin; Mitteilung Nr. 47; Berlin; 1956
- [133] Preß, H.: Neuere Ausbildungen von Staumauern. - Österreichische Bauzeitschrift, 12/1956; S. 273-274
- [134] Preß, H.: Prüfung der statischen Berechnung der Arbeitsgemeinschaft Dyckerhoff & Widmann K.G., Hochtief A.G., Philipp Holzmann A. G. für die Okertalsperre vom 18.10.1952; Berlin, Föhrenweg 18 A
- [135] Quick, H.; Keiper, K.; Meißner, S.; Michael, J. : Vergleich von Ergebnissen numerischer Berechnungen mit in-situ-Messungen am Beispiel zweier Tunnelvortriebe. – Tiefbau, 11/2002; S. 610-616
- [136] Rank, E.; Roßmann, A.: Fehlerschätzung und automatische Netzanpassung bei Finite-Element-Berechnungen. – Bauingenieur, 5/1987; S. 449-454
- [137] Rescher, O. J.: Die Gewölbestaumauer, Berechnung einer Kreiszylinderschale mittels Relaxationsmethode. - Abhandlungen des Dokumentationszentrums der Technik. - Heft 1; Wien; Dokumentationszentrum der Technik mit Unterstützung des Notrings der wissenschaftlichen Verbände Österreichs; 1951
- [138] Rescher, O. J.: Geomechanische Modelluntersuchungen für die Gründung von Talsperren. - Rock mechanics : journal of the International Society for Rock Mechanics, 3/1981; S. 117-166
- [139] Rescher, O. J.: Sicherheit von Talsperren. - Hrsg.: Technische Hochschule in Wien; Eintrittsvorlesungen der Technischen Hochschule in Wien. - Wien; Verlag der Technischen Hochschule Wien; 1973
- [140] Rescher, O. J.: Talsperrenstatik; Berechnung und Bemessung von Gewichtsstaumauern. - Berlin, Heidelberg; Springer-Verlag; 1965 (28.50)
- [141] Rißler, Peter : Talsperrenpraxis. - München; R. Oldenburg Verlag GmbH; 1998; ISBN 3-486-26428-1

- [142] Reißler, Peter: Die Finite-Element-Methode in der Geotechnik. – Bauingenieur, 2/1981; S. 109-113
- [143] Reißler, Peter: Die Überprüfung der Talsperrensicherheit - eine ständige, komplexe, systematische Aufgabe. – Wasserwirtschaft, 7-8/1998; S. 376-378
- [144] Rohn, A.: Beitrag zur Berechnung massiver Staumauern. - Schweizerische Bauzeitung, 10/1922; S. 126-129
- [145] Rouve, G.; Hoffmann, M.: Erfassung der Standsicherheitsverhältnisse älterer Gewichtstaumauern unter Berücksichtigung ihres dreidimensionalen Tragverhaltens sowie nichtlinearer und zeitvarianter Materialeinflüsse. - Hrsg.: Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft Rhein.-Westf. Technische Hochschule Aachen; Schlussbericht zum Untersuchungsauftrag; Untersuchungsauftrag des Ministers für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen. - Band I; Aachen; 1987
- [146] Rouve, G.; Peters, A.; Neliksen, W.: Über die Sicherheitsanalyse alter Gewichtstaumauern - von analytischen zu numerischen Berechnungsmethoden. - Wiss. Zeit. Hochsch. Archit. Bauwesen; Weimar, 1989; S. 95-99
- [147] Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (LfUG), Referat 31 Wasserversorgung, Abwasserbeseitigung, Wasserbau: Verzeichnis der allgemein anerkannten Regeln der Technik für Stauanlagen. - Dresden; 2002
- [148] Schatz, O.: Die Bewegungen von Sperrmauern. - Deutsche Wasserwirtschaft, 8/1930; S. 187-192
- [149] Schmidt, Martin: Talsperren im Harz : Ost- und Westharz. - 7. durchgesehene Auflage; Clausthal-Zellerfeld; Piepersche Druckerei und Verlag GmbH; 1992; ISBN 3-923605-45-5
- [150] Schmidt, Friedrich Reinhard; Totzauer, Franz Werner: Workshop "Messtechnische Probleme bei Betrieb, Überwachung und Kontrolle von Talsperren, Staudämmen und Staumauern". - Journal of the Mittweida University of Technology and Economics. - 1/1997; Volume III; ISSN 1430-3698
- [151] Schneider, Klaus-Jürgen: Bautabellen für Ingenieure. – 13. Auflage; Düsseldorf; Werner Verlag; 1998; ISBN 3804 13477-7
- [152] Schnitter, N.: Statische Sicherheit der Talsperren. - Wasser, Energie, Luft, 5/1976; S. 126-129
- [153] Schulze, E.: Die Bauausführung der Okertalsperre und Okervorsperre. - Wasser und Boden, 2/1955; S. 25-31
- [154] Schulze, E.: Die Okertalsperre, eine Bogengewichtsmauer in Grobsteinbeton. - Nobel Hefte, 1956; S. 255-268
- [155] Schulze, E.: Die Talsperren des Westharzes unter besonderer Berücksichtigung der Okertalsperre. - S. 47-71; 1956

- [156] Schweizerisches Nationalkomitee für Grosse Talsperren, Arbeitsgruppe „Auftrieb“: Auftrieb bei Betonsperren. - 1992
- [157] Schweizerisches Nationalkomitee für Grosse Talsperren: Messanlagen zur Talsperrenüberwachung; Konzept, Zuverlässigkeit und Redundanz; Teil 3: Messgeräte / Messmethoden. - 1987
- [158] Schweizerisches Nationalkomitee für Grosse Talsperren; Ausschuss für Talsperrenbeobachtung, Arbeitsgruppe "Redundanz und Zuverlässigkeit von Messeinrichtungen": Messanlagen zur Talsperrenüberwachung; Konzept, Zuverlässigkeit und Redundanz. - Wasser, Energie, Luft.- (1986)78; 7/8; S. 127-136
- [159] Schweizerisches Nationalkomitee für Grosse Talsperren: Zustandsüberwachung von Stauanlagen und Checklisten für die visuellen Kontrollen. - 1997
- [160] Schweizerisches Talsperrenkomitee: Bevor die Baumaschinen auffahren. - Hrsg.: Schweizerisches Talsperrenkomitee; Staumauer und Staudämme. - <http://www.swissdams.ch/Dams/damtext> (17.10.2002); 2002
- [161] Schweizerisches Talsperrenkomitee: Die verschiedenen Bauweisen von Talsperren. - Hrsg.: Schweizerisches Talsperrenkomitee; Staumauer und Staudämme. - <http://www.swissdams.ch/Dams/damtext> (17.10.2002); 2002
- [162] Schweizerisches Talsperrenkomitee: Eine der größten Herausforderungen für Ingenieure. - Hrsg.: Schweizerisches Talsperrenkomitee; Staumauer und Staudämme. - <http://www.swissdams.ch/Dams/damtext> (17.10.2002); 2002
- [163] Schweizerisches Talsperrenkomitee: Sicherheit über alles. - Hrsg.: Schweizerisches Talsperrenkomitee; Staumauern und Staudämme. - <http://www.swissdams.ch> (12.12.2002); 2002
- [164] Schweizerisches Talsperrenkomitee: Talsperren stemmen sich dem Wasserdruck entgegen. - Hrsg.: Schweizerisches Talsperrenkomitee; Staumauer und Staudämme. - <http://www.swissdams.ch/Dams/damtext> (17.10.2002); 2002
- [165] Seidel, J.; Stroh, D.: 40 Jahre Talsperrenbau Weimar. - Vorträge anlässlich der Jubiläumsveranstaltung am 7. April 1994. - 1994
- [166] Sieber, H.-U.: Alterungsprozesse in Staumauern. - Wasserwirtschaft, Wassertechnik: WWT, 3/1982; S. 86-88
- [167] Standfuß, M.: Temperaturverformungen an der Talsperre Gottleuba. - Hrsg.: Technische Universität Dresden; Fakultät Bauingenieurwesen; Diplomarbeit. - Dresden; 1998
- [168] Stempniewski, L.; Eibl, J.: Aus: Beton-Kalender 1993; Taschenbuch für Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonbau sowie verwandter Fächer. - Finite Elemente im Stahlbeton (Kapitel F); S. 249-312; Band 1; 82. Jahrgang; Berlin; Ernst & Sohn; 1993

- [169] Sturm, Vinzent: Untersuchungen des Verformungsverhaltens der Talsperre Dröda. - Hrsg.: Technische Universität Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen; Diplomarbeit. - Dresden; 2001
- [170] Tazl, M.: Temperaturinduzierte Verformungsanalysen an einer Bogenstaumauer mit aufgesetzter Schwergewichtsmauer, Studienarbeit am Institut für Geotechnik und Markscheidewesen, TU Clausthal, unveröffentlicht, 2004
- [171] Tazl, M.: Untersuchung des Temperaturverlaufs im Beton der Okertalsperre, Studienarbeit am Institut für Geotechnik und Markscheidewesen, TU Clausthal, unveröffentlicht, 2003
- [172] Terzaghi, K.: Beanspruchung von Gewichtsstau mauern durch das strömende Sickerwasser. – Bautechnik, 12/1934; S. 379-382
- [173] Thuro, Kurosch & Plinninger, Ralf: Einführung in die Ingenieurgeologie: Felsmechanisches Laborpraktikum für Geologen. - Hrsg.: Lehrstuhl für Allgemeine, Angewandte und Ingenieurgeologie, Technische Universität München; 7; München; 1998
- [174] Tölke, Friedrich: Prüfung der statischen Berechnung der Arbeitsgemeinschaft Dyckerhoff & Widmann KG, Hochtief AG, Philipp Holzmann AG für die Okertalsperre vom 18.10.1952; Karlsruhe-Durlach, Am Burgweg 11
- [175] Tschech, E.; Jaburek, F.: Berechnung von Bogenstaumauern im Vergleich mit den Ergebnissen statistischer Modellversuche. - Österreichische Bauzeitschrift, 2/1951; S. 17-23
- [176] VEB Spezialbaukombinat Wasserbau Weimar: Fachtagung Talsperrenbau - Referate; Weimar; 1974
- [177] Verein Deutscher Zementwerke: Zement Taschenbuch. – 50. Auflage; Düsseldorf; Verlag Bau+Technik GmbH; 2002; ISBN 3-640-427-4
- [178] Vogel, Alexius: Die Gewichtsstau mauern im Talsperrenbau. - Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift, 11/1982; S. 385-392
- [179] Walther, René: Bauen mit Beton; Einführung für Architekten und Bauingenieure. - Berlin; Ernst & Sohn; 1997; ISBN 3-443-01284-9
- [180] Wesche, K.: Baustoffe für tragende Bauteile. - Band 1. Grundlagen; 3. Auflage; Wiesbaden, Berlin; Bauverlag GmbH; 1996; ISBN 3-7625-3283-4
- [181] Wetter, Mensch, Natur: Wetterdaten;
www.wetter-mensch-natur.de/wetter/monate/mittelwerte/mittelwerte.htm
- [182] Widmann, R.: Zur Überwachung von Talsperren. - Österr. Ing.- und Architektenzeitschrift, 11-12/1999

- [183] Widmann, R.; Heigerth, G.: Felsverformungen und Sickerströmungen im Untergrund der Gewölbemauer Schlegeis. - Hrsg.: Die Österreichische Staubeckenkommission, Der Österreichische Wasserwirtschaftsverband, Das Österreichische Nationalkomitee, Die Internationale Talsperrenkommission; Schriftleitung: Prof. Dr. Helmut Simmler; Die Talsperren Österreichs; Österreichische Beiträge zum 12. Talsperrenkongress in Mexiko 1976; Heft 22.- Wien; 1975; S. 33-45
- [184] Widmann, Richard: Zur Gründung von Staumauern. – Felsbau, 1/1997; S. 9-21
- [185] Wittenburg, J.; Pestel, E.: Festigkeitslehre; Ein Lehr- und Arbeitsbuch. - 3. Auflage; Springer Verlag; ISBN 3-540-42099-1
- [186] Wittke, W.: Geotechnische Grundlagen und Standsicherheiten für den Entwurf von Staumauern. - Wasser Berlin: Kongress und Ausstellung Berlin, 1/1981; S. 548-576
- [187] Wittke, W.; Gell, K.: Wechselwirkung zwischen Staumauer und Fels. - Wasserwirtschaft, 74 (1984); S. 137-141
- [188] Wittke, W.; Wallner, M.; Rodatz, W.: Räumliche Berechnung der Standsicherheit von Hohlräumen, Böschungen und Gründungen in anisotropen, klüftigen Gebirge nach der Methode finiter Elemente. – Straße, Brücke, Tunnel, 8/1972; S. 200-209
- [189] Wittke, W.; Gell, K.: Wechselwirkung zwischen Staumauer und Untergrund. - Wasserwirtschaft, 74 (1984); S. 137-141
- [190] Wittke, W.; Rissler, P.; Semprich, S.: Dreidimensionale, laminare und turbulente Strömungsvorgänge in klüftigem Fels nach einem diskontinuierlichen und einem kontinuierlichen Modell. - Proc. Symp. Int. Ges. Felsmechanik, "Durchströmen von klüftigem Fels", Erd- und Grundbau, Essen. - 1972; S. T1-H 1 bis T1-H 18
- [191] Wittke, W.; Schetelig, K.: Gründung einer Bogengewichtsmauer in Schiefer. - Baugrundtagung, Berlin. - 1978; S. 569-598
- [192] Wriggers, Peter: Finite Elemente in der Baupraxis : Modellierung, Berechnung und Konstruktion. - Beiträge der Tagung FEM '98 an der Technischen Universität Darmstadt. - Berlin; Ernst & Sohn GmbH; 1998; ISBN 3-433-01775-1
- [193] Wriggers, Peter : Nichtlineare Finite-Element-Methoden. - Berlin Heidelberg; Springer-Verlag; 2001; ISBN 3-540-67747-X
- [194] Ziegler, P.: C: Die Berechnung massiver Talsperren. - Der Talsperrenbau. - Band II; 3. neubearbeitete Auflage; Berlin; Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn; 1927
- [195] Zierman, Stephan: DVWK-Merkblattes Nr. 222 - Foliensammlung
- [196] Zilch K.; Staller, M.; Brandes, Ch.: Anwendung statistischer Verfahren für die Auswertung von Versuchsdaten. - Bauingenieur .- 1/1999; S. 8-16
- [197] Zilch; Diedrichs; Katzenbach: Wasserbau - Handbuch für Bauingenieure. - Berlin; Springer-Verlag; 2002; S. 125-134; ISBN 3-540-65760-6

Anhang

1 Inputfile „Initialmauertemperatur1“

```

!Inputfile für den Initialtemperaturzustand der Staumauer, auf den die nachfolgenden
!Temperaturfeldberechnungen aufsetzen
!Elementtyp Solid70
!Einwirkungen: Betontemperaturen aus der Messung vom 30.10.2002
fini
/clear
/PSEARCH,G:\Macros                                !Pfad für Macros
/filnam,Initialmauertemp.-1                         !Jobname
/title,Initialmauertemp.-1                          !Titel
KoordDefBS                                           !Aufruf Macro für Koordinatendefinitionen
                                                    Staumauer Block 1 bis 10
KoordDefBW                                           !Aufruf Macro für Koordinatendefinitionen
                                                    Widerlagereich Mauer
KoordDefW                                           !Aufruf Macro für Koordinatendefinitionen
                                                    Widerlagereich Fels
*ask,Zw,Stauhoehe min=133.1 max=200,133.10         !Abfrage der Stauhöhe
*ask,TR,Refrenztemperatur,5                         !Abfrage der Referenztemperatur
*ask,BT1,Betontemperatur1,6.62                     !Abfrage der Betontemperatur BT1
*ask,BT2,Betontemperatur2,9.18                     !Abfrage der Betontemperatur BT2
*ask,BT3,Betontemperatur3,11.34                    !Abfrage der Betontemperatur BT3
*ask,BT4,Betontemperatur4,13.29                     !Abfrage der Betontemperatur BT4
*ask,BT5,Betontemperatur5,13.80                     !Abfrage der Betontemperatur BT5
*ask,BT6,Betontemperatur6,13.93                     !Abfrage der Betontemperatur BT6
*ask,BT7,Betontemperatur7,13.59                     !Abfrage der Betontemperatur BT7
*ask,TU,Untergrundtemperatur,5                     !Abfrage der Untergrundtemperatur (Fels)

/prep7
et,1,solid70                                         !Aufruf Preprozessor
                                                    !3D-Solid-Element Solid70 für
                                                    Temperaturfeldberechnung
csys,1                                               !Zylindrisches Koordinatensystem
MatDef                                              !Aufruf Macro für Materialeigenschaften

kpn=0
delkpn=50
*DO,bln,1,11,1
  KPDefBS,kpn,bln
  kpn=kpn+delkpn
*ENDDO

kdele,530,535,1
kpn=0
delkpn=50
*DO,bln,1,12,1
  VolDef,kpn,kpn+delkpn,bln
  kpn=kpn+delkpn
*ENDDO

kpn=600
delkpn=50
*DO,bln,1,4,1
  KPDefBW,kpn,bln
  kpn=kpn+delkpn
*ENDDO

```

VolDefBW	!Aufruf Macro zur Volumengenerierung der Bogenmauer im Widerlagerbereich
kpn=800	!1. KP-Nummer-1
delkpn=50	!Inkrement für KP-Nummern
*DO,bln,1,4,1	!Do-Schleife Widerlagerblock (Fels) 1 bis 2
KPDefW,kpn,bln	!Aufruf Macro zur blockweisen KP- Definition im Widerlagerbereich (Fels)
kpn=kpn+delkpn	
*ENDDO	
VolDefW	!Aufruf Macro zur Volumengenerierung im Widerlagerbereich (Fels)
VOVB	!Aufruf Macro Volumenverbindung im Bogenmauer- und Felsbereich
esize,0,5	!Vorgabe der Elementierungsgröße
vmesh,all	!Vernetzung
MZW2	!Aufruf Macro Materialzuweisung Fels
MZW3	!Aufruf Macro Materialzuweisung im Widerlagerbereich
/solu	!Aufruf Solutionmodus
BT1-Temp	!Macro zum Antragen der Betontemperatur BT1
BT2-Temp	!Macro zum Antragen der Betontemperatur BT2
BT3-Temp	!Macro zum Antragen der Betontemperatur BT3
BT4-Temp	!Macro zum Antragen der Betontemperatur BT4
BT5-Temp	!Macro zum Antragen der Betontemperatur BT5
BT6+7-Temp	!Macro zum Antragen der Betontemperatur BT6 und BT7
UTemp	!Macro zum Antragen der Untergrundtemperatur TU
Solve	!Aufruf Solutionmodus
/post1	!Genereller Postprozessor zur Ergebnisauswertung
plns,temp	!Grafische Darstellung der berechneten Temperaturen
*get,nmax,node,0,num,max	!Abfragen der maximalen Knotenanzahl und Zuweisung zum Parameter "nmax"
*Dim,intemp,array,nmax,3	!Dimensionierung des Array "intemp" mit Zeilen=nmax und Spalten=3
*cfopen,G:\Ansys_work\Initialtemp\Initialtemp1,lis	!Öffnen der Ergebnisdatei "Initialtemp1", in die die Knotentemperaturen geschrieben werden
*do,Knoten,1,nmax,1	!Do-Schleife
*get,intemp(Knoten),node,Knoten,temp	!Abfragen der Knotentemperaturen und Zuweisung zum Parameter "intemp"
*cfwrite,%Knoten%,%intemp(Knoten)%	!Schreiben der Zeit, Knotennummer und zugehörigen Knotentemperatur in die geöffnete Datei
*enddo	
*cfclos	!Schließen der Datei

2 Inputfile „Transiente Temp.-Analyse1“

!Inputfile für transiente Temperaturfeldberechnung

!Für die Temperaturfeldberechnung wird der Elementtyp Solid70

!und für die anschließende Strukturanalyse der Elementtyp Solid45 verwendet

!Einwirkungen: Stauhöhe und Temperaturen aus den Messungen (Daten1.txt)

fini

/clear

/PSEARCH,G:\Macros

/filnam,TransienteTemp.-Analyse-1

/title,TransienteTemp.-Analyse-1

/config,nres,

/output,out,txt

KoordDefBS

KoordDefBW

KoordDefW

*ask,Anfdatum,Anfangsdatum,36465

*ask,Enddatum,Enddatum,37420

Dauer=Enddatum-Anfdatum+1

*Dim,Daten,table,Dauer,4

*Tread,Daten,G:\Ansys_work\Einwirkungen\Daten1.txt

KLB=25

KWB=46

/prep7

et,1,solid70

csys,1

MatDef

kpn=0

delkpn=50

*DO,bln,1,11,1

KPDefBS,kpn,bln

kpn=kpn+delkpn

*ENDDO

kdele,530,535,1

kpn=0

delkpn=50

*DO,bln,1,12,1

VolDef,kpn,kpn+delkpn,bln

kpn=kpn+delkpn

*ENDDO

kpn=600

delkpn=50

*DO,bln,1,4,1

!Pfad für Macros

!Jobname

!Titel

!Erweiterung der Lastschritte auf 3000

!Schreiben des Outputfiles "out.txt"

!Aufruf Macro für Koordinatendefinitionen
Staumauer Block 1 bis 10

!Aufruf Macro für Koordinatendefinitionen
Widerlagereich Mauer

!Aufruf Macro für Koordinatendefinitionen
Widerlagereich Fels

!Abfrage des Anfangsdatums der
transienten Analyse

!Abfrage des Enddatums der
transienten Analyse

!Berechnungszeitraum über Parameter
definieren

!Dimensionierung des Tables "Daten" mit
Zeilen=Dauer und Spalten=4

!Einlesen der Daten in das Table "Daten"
aus der Datei "Daten1.txt", in der die
Messdaten enthalten sind

!Wärmeübergangskoeffizient Luft-Beton
25 W/(m**2*K)

!Wärmeübergangskoeffizient
Wasser-Beton 46 W/(m**2*K)

!Aufruf Preprozessor

!3-D Solid-Element Solid70 für
Temperaturfeldberechnung

!Zylindrisches Koordinatensystem

!Aufruf Macro für Materialeigenschaften

!1. Keypointnummer(KP)-1

!Inkrement für KP-Nummern

!Do von Block 1 bis 10

!Aufruf Macro zur blockweisen KP-Definition

!Erhöhen der KP-Nummer

!Löschen überzähliger Keypoints

!1. KP-Nummer-1

!Inkrement für KP-Nummern

!Do-Schleife von Block 1 bis 10

!Volumendefinition im Block 1 bis 10

!Erhöhen der KP-Nummer

!1. KP-Nummer-1

!Inkrement für KP-Nummern

!Do-Schleife Widerlagerblock (Mauer) 1 bis 2

KPDefBW,kpn,bln	!Aufruf Macro zur blockweisen KP-Definition der Bogenmauer im Widerlagerbereich
kpn=kpn+delkpn	!Erhöhen der KP-Nummer
*ENDDO	
VolDefBW	!Aufruf Macro zur Volumengenerierung der Bogenmauer im Widerlagerbereich
kpn=800	!1. KP-Nummer-1
delkpn=50	!Inkrement für KP-Nummern
*DO,bln,1,4,1	!Do-Schleife Widerlagerblock (Fels) 1 bis 2
KPDefW,kpn,bln	!Aufruf Macro zur blockweisen KP-Definition im Widerlagerbereich (Fels)
kpn=kpn+delkpn	
*ENDDO	
VolDefW	!Aufruf Macro zur Volumengenerierung im Widerlagerbereich (Fels)
VOVB	!Aufruf Macro Volumenverbindung im Bogenmauer- und Felsbereich
esize,0,5	!Vorgabe der Elementierungsgröße
vmesh,all	!Vernetzung
MZW2	!Aufruf Macro Materialzuweisung Fels
MZW3	!Aufruf Macro Materialzuweisung Widerlagerbereich
/solu	!Aufruf Solutionmodus
*get,nmax,node,0,num,max	!Abfragen der maximalen Knotenanzahl und Zuweisung zum Parameter "nmax"
*Dim,InitialTemp,Table,nmax,1	!Dimensionierung des Tables "InitialTemp" mit Zeilen=nmax und Spalten=1
*Tread,InitialTemp,G:\Ansys_work\Initialtemp\Initialtemp1.txt,,1	
	!Einlesen der Daten in das Table "Initialtemp" aus der Datei "Initialtemp1.txt", in der die Initialmauertemperaturen enthalten sind
*do,Knoten,1,nmax,1	!Do-Schleife
ic,Knoten,Temp,InitialTemp(Knoten,1)	!Zuweisen der Initialtemperaturen zu den Knoten
*enddo	
antype,trans	!Aufruf des transienten Berechnungsmodus
*do,Datum,Anfdatum,Enddatum,1	!Do-Schleife
Zw=Daten(Datum,1)	!Zuweisung der Stauhöhe in Abhängigkeit vom Datum
WTempT,Datum	!Zuweisung der Wassertemperatur in Abhängigkeit vom Datum
LWTempT,Datum	!Wasserseitige Zuweisung der Lufttemperatur in Abhängigkeit vom Datum
LLTempT,Datum	!Luftseitige Zuweisung der

LLTTempT,Datum	Lufttemperatur in Abhängigkeit vom Datum im oberen Mauerbereich !Luftseitige Zuweisung der Lufttemperatur in Abhängigkeit vom Datum im unteren Mauerbereich und Tal
UTempT	!Zuweisung der Untergrundtemperatur
Zeit=(Datum-Anfdatum+1)*86400	!Parameter für die Lastschritte in Sekunden aus Datum berechnen
Time,Zeit	!Festlegen der Lastschritte für die transiente Analyse
timint,on	!transiente thermische Effekte einschalten
autots,on	!automatisches Substepping aktivieren
oures,nsol,Last	!nur Knotenlösungen in den Resultfile schreiben
Lswrite,(Datum-Anfdatum+1) *enddo	!Schreiben der Lastschritte in eine Datei
Eqslv,front pivcheck,off save	!Frontlöser !Ergebnissteuerung !Speicherbefehl
Lssolve,1,Enddatum-Anfdatum+1,1 Finish	!Lösen der angegebenen Lastschritte !Ende
/post1	!Aufruf des Postprozessors
*get,templ,active,0,solu,ncmls	!Abfragen der Anzahl der Lastschritte und Zuweisung zum Parameter "templ"
*Dim,name,array,nmax,3	!Dimensionierung des Array "name" mit Zeilen=nmax und Spalten=3
*Dim,ntemp,array,nmax,3	!Dimensionierung des Array "ntemp" mit Zeilen=nmax und Spalten=3
*do,ls,1,templ,1 set,ls	!Do-Schleife !Aufruf der Ergebnisse der einzelnen Lastschritte
tag=%ls%+Anfdatum-1	!Festlegen des Dateinamens zum Speichern der Knotentemperaturen
*get,name(ls),active,0,set,time	!Abfragen der Anzahl der Zeit der Lastschritte (s) und Zuweisung zum Parameter "name"
*cfopen,G:\Ansys_work\Knotentemp\%tag%,txt	!Öffnen der Ergebnisdatei "%tag%", in die die Knotentemperaturen geschrieben werden
*do,Knoten,1,nmax,1 *get,ntemp(Knoten),node,Knoten,temp	!Do-Schleife !Abfragen der Knotentemperaturen und Zuweisung zum Parameter "ntemp"
*cfwrite,%name(ls)%,Knoten,%ntemp(Knoten)%	!Schreiben der Zeit, Knotennummer und zugehörigen Knotentemperatur in die geöffnete Datei
*enddo *enddo *cfclos	!Schließen der Datei
*do,ls,1,templ,1 set,ls	!Do-Schleife !Aufruf der Ergebnisse der einzelnen Lastschritte
tag=%ls%+Anfdatum-1	!Festlegen des Dateinamens zum

*cfopen,G:\Ansys_work\Knotentemp1\%tag%,txt	Speichern der ausgewählten Knotentemperaturen !Öffnen der Ergebnisdatei "%tag%", in die die Knotentemperaturen geschrieben werden
*get,name(ls),active,0,set,time	!Abfragen der Anzahl der Zeit der Lastschritte (s) und Zuweisung zum Parameter "name"
*get,ntemp(10083),node,10083,temp	!Abfragen der Knotentemperatur des Knotens 10083 und Zuweisung zum Parameter "%ntemp(10083)"
*cfwrite,%name(ls)%,10083,%ntemp(10083)%	!Schreiben der Zeit, Knotennummer und zugehörigen Knotentemperatur in die geöffnete Datei
*get,ntemp(9644),node,9644,temp	!Abfragen der Knotentemperatur des Knotens 9644 und Zuweisung zum Parameter "%ntemp(9644)"
*cfwrite,%name(ls)%,9644,%ntemp(9644)%	!Schreiben der Zeit, Knotennummer und zugehörigen Knotentemperatur in die geöffnete Datei
*get,ntemp(9665),node,9665,temp	!Abfragen der Knotentemperatur des Knotens 9665 und Zuweisung zum Parameter "%ntemp(9665)"
*cfwrite,%name(ls)%,9665,%ntemp(9665)%	!Schreiben der Zeit, Knotennummer und zugehörigen Knotentemperatur in die geöffnete Datei
*get,ntemp(9662),node,9662,temp	!Abfragen der Knotentemperatur des Knotens 9662 und Zuweisung zum Parameter "%ntemp(9662)"
*cfwrite,%name(ls)%,9662,%ntemp(9662)%	!Schreiben der Zeit, Knotennummer und zugehörigen Knotentemperatur in die geöffnete Datei
*get,ntemp(9663),node,9663,temp	!Abfragen der Knotentemperatur des Knotens 9663 und Zuweisung zum Parameter "%ntemp(9663)"
*cfwrite,%name(ls)%,9663,%ntemp(9663)%	!Schreiben der Zeit, Knotennummer und zugehörigen Knotentemperatur in die geöffnete Datei
*get,ntemp(9482),node,9482,temp	!Abfragen der Knotentemperatur des Knotens 9482 und Zuweisung zum Parameter "%ntemp(9482)"
*cfwrite,%name(ls)%,9482,%ntemp(9482)%	!Schreiben der Zeit, Knotennummer und zugehörigen Knotentemperatur in die geöffnete Datei
*get,ntemp(9479),node,9479,temp	!Abfragen der Knotentemperatur des Knotens 9479 und Zuweisung zum Parameter "%ntemp(9479)"
*cfwrite,%name(ls)%,9479,%ntemp(9479)%	!Schreiben der Zeit, Knotennummer und zugehörigen Knotentemperatur in die geöffnete Datei
*get,ntemp(9471),node,9471,temp	!Abfragen der Knotentemperatur des Knotens 9471 und Zuweisung zum Parameter "%ntemp(9471)"
*cfwrite,%name(ls)%,9471,%ntemp(9471)%	!Schreiben der Zeit, Knotennummer und zugehörigen Knotentemperatur in die geöffnete Datei
*enddo	
*cfclos	!Schließen der Dateien

3 Inputfile „Strukturanalyse-DW+DT1“

!Inputfile zur Strukturberechnung

! Elementtyp Solid45

!Einwirkungen: Wasserdruckdifferenz und Temperaturdifferenz (Daten1.txt)

fini

/clear

/PSEARCH,G:\Macros

/filnam,Modell-dw+dT-1

/title,Modell-dw+dT-1

KoordDefBS

KoordDefBW

KoordDefW

*ask,Datum1,Datum1,36465

*ask,Datum2,Datum2,37420

*Dim,Daten,table,956,4

*Tread,Daten,G:\Ansys_work\Einwirkungen\Daten1.txt

RZw=Daten(Datum1,1)

Zw=Daten(Datum2,1)

/prep7

et,1,solid45

csys,1

MatDef

kpn=0

delkpn=50

*DO,bln,1,11,1

KPDefBS,kpn,bln

kpn=kpn+delkpn

*ENDDO

kdele,530,535,1

kpn=0

delkpn=50

*DO,bln,1,12,1

VolDef,kpn,kpn+delkpn,bln

kpn=kpn+delkpn

*ENDDO

kpn=600

delkpn=50

*DO,bln,1,4,1

KPDefBW,kpn,bln

kpn=kpn+delkpn

*ENDDO

!Pfad für Macros

!Jobname

!Titel

!Aufruf Macro für Koordinatendefinitionen
Staumauer Block 1 bis 10

!Aufruf Macro für Koordinatendefinitionen
Widerlagereich Mauer

!Aufruf Macro für Koordinatendefinitionen
Widerlagereich Fels

!Abfrage des Datums vom 1. Zeitpunkt

!Abfrage des Datums vom 2. Zeitpunkt

!Dimensionierung des Tables "Daten" mit
Zeilen=Dauer und Spalten=4

!Einlesen der Daten in das Table "Daten"
aus der Datei "Daten1.txt", in der die
Messdaten enthalten sind

!Zuweisung der Stauhöhe in Anhängigkeit
vom Datum 1

!Zuweisung der Stauhöhe in Anhängigkeit
vom Datum 2

!Aufruf Preprozessor

!Elementtyp Solid 45

!Zylindrisches Koordinatensystem

!Aufruf Macro für Materialeigenschaften

!1. Keypointnummer(KP)-1

!Inkrement für KP-Nummern

!Do von Block 1 bis 10

!Aufruf Macro zur blockweisen
KP-Definition

!Erhöhen der KP-Nummer

!Löschen überzähliger Keypoints

!1. KP-Nummer-1

!Inkrement für KP-Nummern

!Do-Schleife von Block 1 bis 10

!Volumendefinition im Block 1 bis 10

!Erhöhen der KP-Nummer

!1. KP-Nummer-1

!Inkrement für KP-Nummern

!Do-Schleife Widerlagerblock (Mauer) 1 bis 2

!Aufruf Macro zur blockweisen
KP-Definition der Bogenmauer im
Widerlagerbereich

!Erhöhen der KP-Nummer

VolDefBW	!Aufruf Macro zur Volumengenerierung der Bogenmauer im Widerlagerbereich
kpn=800	!1. KP-Nummer-1
delkpn=50	!Inkrement für KP-Nummern
*DO,bln,1,4,1	!Do-Schleife Widerlagerblock (Fels) 1 bis 2
KPDefW,kpn,bln	!Aufruf Macro zur blockweisen KP-Definition im Widerlagerbereich (Fels)
kpn=kpn+delkpn	
*ENDDO	
VolDefW	!Aufruf Macro zur Volumengenerierung im Widerlagerbereich (Fels)
VOVB	!Aufruf Macro Volumenverbindung im Bogenmauer- und Felsbereich
esize,0,5	!Vorgabe der Elementierungsgröße
vmesh,all	!Vernetzung
MZW2	!Aufruf Macro Materialzuweisung Fels
MZW3	!Aufruf Macro Materialzuweisung Widerlagerbereich
/solu	!Aufruf Solutionmodus
RBA	!Aufruf Macro Randbedingungen Aufstandsfläche Fels
RBF	!Aufruf Macro Randbedingungen seitliche Berandungsflächen Fels
WDruckD	!Aufruf Macro zur Aufbringung der hydrostatischen Druckdifferenz
*get,nmax,node,0,num,max	!Abfragen der maximalen Knotenanzahl und Zuweisung zum Parameter "nmax"
*Dim,KnotenTemp,Table,nmax,1	!Dimensionierung des Tables "KnotenTemp" mit Zeilen=nmax und Spalten=1
*Tread,KnotenTemp,G:\Ansys_work\Knotentemp\TDiff%Datum2%_%Datum1%.txt	!Einlesen der Daten in das Table "KnotenTemp" aus der Datei " TDiff%Datum2%_%Datum1%.txt", in der die Differenzknotentemperaturen enthalten sind
*do,Knoten,1,nmax,1	!Do-Schleife
bf,Knoten,Temp,KnotenTemp(Knoten,1)	!Aufbringen der Differenzknotentemperaturen
*enddo	
solve	!Aufruf Solutionmodus
/post1	!Genereller Postprozessor zur Ergebnisauswertung
!Verschiebungsverlauf im Bogen- und Schwergewichtsmauerteil entlang der wasserseitigen !Bauwerkskante in x-Richtung neben der Fuge 5/6	
rsys,1	
path,uux,2	!Pfadweg festlegen
ppath,1,node(78.00000,92.31480,200.0000)	!Beginn des Pfades
ppath,2,node(78.00000,92.31480,131.5000)	!Ende des Pfades
pdef,uux,u,x	!Pfaddefinition
/grid,1	!Raster erstellen

```

plpath,uux                                !Plotten des Graphs entlang des def.
...                                       Pfades

!Pfad Fuge 9/10
rsys,1
path,uux9-10,2                            !Pfadweg festlegen
ppath,1,node(78.00000,134.58979232813100,200.0000)!Beginn des Pfades
ppath,2,node(78.00000,134.58979232813100,131.5000)!Ende des Pfades
pdef,uux9-10,u,x                          !Pfaddefinition
/grid,1                                    !Raster erstellen
plpath,uux9-10                            !Plotten des Graphs entlang des def.
                                           Pfades

```

4 Macros

Nachfolgend sind die wesentlichen Macros bzw. Teile der Macros, die in den einzelnen Inputfiles aufgerufen werden, ausdokumentiert. Bei Macros, die sehr ähnlich sind und beispielsweise nur verschiedene Modellbereiche selektieren, sonst aber identisch sind, wird immer nur stellvertretend ein Macro erläutert.

4.1 Macro „KoordDefBS“ für die Koordinatendefinition der Staumauer

!Macro für Koordinatendefinition im Staumauerbereich

!Allgemeingültige Modellparameter

Zsgm=	200.00000000000000	!Höhe OK Schwergewichtsmauer
Zok=	196.80000000000000	!Höhe Oberer Kontrollgang
Zbm=	187.00000000000000	!Höhe OK Bogenstaumauer
Zqa1=	158.00000000000000	!Höhe Beginn Verbreiterung Querschnitt
Zfa=	100.00000000000000	!Höhe Abschluss Felsmodell
Rw=	78.00000000000000	!Radius zur Wasserseite
Rl=	70.00000000000000	!Radius zur Luftseite
Rmf=	73.00000000000000	!Radius Mauerfußpunkt
Rfaw=	120.00000000000000	!Radius Abschluss Felsmodell wasserseitig
Rfal=	20.00000000000000	!Radius Abschluss Felsmodell luftseitig

!Veränderliche querschnittsabhängige Modellparameter

*dim,Teta,array,12 !Def. des Teta-Vektors

```

Teta(1)= 36.18041967795820
Teta(2)= 46.47817464449870
Teta(3)= 57.93733054711520
Teta(4)= 69.39648644973160
Teta(5)= 80.85564235234810
Teta(6)= 92.31479825496460
Teta(7)= 103.77395415758100
Teta(8)= 115.23311006019700
Teta(9)= 124.91145119416400
Teta(10)= 134.58979232813100
Teta(11)= 143.85777179801700

```

*dim,Zmf,array,12

!Def. Höhe Mauerfußpunkt

```

Zmf(1)= 160.80
Zmf(2)= 150.6622377622380
Zmf(3)= 139.3811188811190
Zmf(4)= 128.10

```

Zmf(5)=	126.70	
Zmf(6)=	126.50	
Zmf(7)=	126.50	
Zmf(8)=	126.50	
Zmf(9)=	126.60	
Zmf(10)=	126.60	
Zmf(11)=	140.70	
*dim,Zmaxb,array,12		!Def. Höhe größte Mauerbreite
Zmaxb(1)=	Zmf(1)+5	
Zmaxb(2)=	Zmf(2)+5	
Zmaxb(3)=	Zmf(3)+5	
Zmaxb(4)=	Zmf(4)+5	
Zmaxb(5)=	Zmf(5)+5	
Zmaxb(6)=	Zmf(6)+5	
Zmaxb(7)=	Zmf(7)+5	
Zmaxb(8)=	Zmf(8)+5	
Zmaxb(9)=	Zmf(9)+5	
Zmaxb(10)=	Zmf(10)+5	
Zmaxb(11)=	Zmf(11)+5	
*dim,Zfw,array,12		!Def. Höhe Felseinbindung, W
Zfw(1)=	74.50	
Zfw(2)=	67.20	
Zfw(3)=	56.50	
Zfw(4)=	52.50	
Zfw(5)=	49.10	
Zfw(6)=	38.00	
Zfw(7)=	33.80	
Zfw(8)=	33.10	
Zfw(9)=	40.20	
Zfw(10)=	47.70	
Zfw(11)=	58.40	
*dim,Zfl,array,12		!Def. Höhe Felseinbindung, L
Zfl(1)=	74.00	
Zfl(2)=	67.00	
Zfl(3)=	60.00	
Zfl(4)=	52.50	
Zfl(5)=	49.10	
Zfl(6)=	46.00	
Zfl(7)=	41.30	
Zfl(8)=	42.70	
Zfl(9)=	42.70	
Zfl(10)=	44.70	
Zfl(11)=	62.00	
*dim,Rmaxb,array,12		!Def. Radius größte Mauerbreite, L
Rmaxb(1)=	0.000000000000000	
Rmaxb(2)=	8.93738080101720	
Rmaxb(3)=	3.80959949141770	
Rmaxb(4)=	8.68181818181820	
Rmaxb(5)=	8.04545454545450	
Rmaxb(6)=	7.95454545454550	
Rmaxb(7)=	7.95454545454550	
Rmaxb(8)=	7.95454545454550	
Rmaxb(9)=	8.000000000000000	
Rmaxb(10)=	8.000000000000000	
Rmaxb(11)=	4.40909090909090	
*dim,Rfl,array,12		!Def. Radius Felseinbindung, L
Rfl(1)=	70.000000000000000	
Rfl(2)=	70.000000000000000	
Rfl(3)=	0.000000000000000	
Rfl(4)=	7.500000000000000	
Rfl(5)=	5.95454545454550	

```

Rfl(6)=      4.54545454545450
Rfl(7)=      2.40909090909090
Rfl(8)=      3.04545454545450
Rfl(9)=      3.04545454545450
Rfl(10)=     3.95454545454550
Rfl(11)=     0.00000000000000

```

```
*dim,Typ,array,12
```

```
!Def. des Blocktyps für
Volumenerzeugung
```

```

Typ(1)=      1
Typ(2)=      2
Typ(3)=      3
Typ(4)=      4
Typ(5)=      4
Typ(6)=      4
Typ(7)=      4
Typ(8)=      4
Typ(9)=      4
Typ(10)=     5

```

4.2 Macro „MatDef“ für die Materialeigenschaften

```
!Macro Materialparameter
```

```
!Definition Materialeigenschaften Beton
```

```

mp,ex,1,3.7e10
mp,alpx,1,5e-6
mp,nuxy,1,0.2
mp,dens,1,2.6e3
mp,kxx,1,3.5

```

```
!E = 37.000 N/mm2=3*10**10 N/m2
```

```
!Wärmedehnzahl
```

```
!Querdehnzahl
```

```
!Dichte = 2600 kg/m3
```

```
!Wärmeleitfähigkeit des Talsperrenbetons:
```

```
Diabas (Basalt) 3,5 W/(mK);
```

```
Normalbeton 2,1 W/(mK)
```

```
Annahme daher 2,5 W/(mK)
```

```
!spezifische Wärmekapazität
von Beton 1050 J/(kg*K)
```

```
mp,c,1,1050
```

```
!Definition Materialeigenschaften Untergrund
```

```

mp,ex,2,2.4e10
mp,dens,2,2.6e3
mp,kxx,2,3.5

```

```
!E = 24.000 N/mm2=2.4*10**10 N/m2
```

```
!Dichte 2200 kg/m3
```

```
!Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes
```

```
(Tonschiefer, Sedimentgestein)2,3 W/(mK)
```

```
!Querdehnzahl
```

```
!spezifische Wärmekapazität
von Beton 1050 J/(kg*K)
```

```
mp,nuxy,2,0.2
```

```
mp,c,2,1050
```

```
!Definition Materialeigenschaften Widerlagerbereich
```

```

mp,ex,3,1.8e10
mp,dens,3,2.6e3
mp,kxx,3,3.5

```

```
!E = 18.000 N/mm2=1.8*10**10 N/m2
```

```
!Dichte 2200 kg/m3
```

```
!Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes
```

```
(Tonschiefer, Sedimentgestein)2,3 W/(mK)
```

```
!Querdehnzahl
```

```
!spezifische Wärmekapazität
von Beton 1050 J/(kg*K)
```

```
mp,nuxy,3,0.2
```

```
mp,c,3,1050
```

4.3 Macro „KPDefBS“ zur Definition der Keypoints der Staumauer

```
!Macro zur Keypointerzeugung der Staumauer von Block 1 bis 10
```

```
!Keypoints für den Querschnitt Block arg2
```



```

!arg1 = 1. KP-Nummer -1
!arg2 = Blocknummer
!Keypoints für den Querschnitt Block arg2 Anfang
!k,arg1+1,Rw,Teta(arg2),Zw
!k,arg1+2,RI,Teta(arg2),Zw
k,arg1+3,Rw,Teta(arg2),Zmaxb(arg2)
k,arg1+4,Rw,Teta(arg2),Zfw(arg2)
k,arg1+5,Rw,Teta(arg2),Zqa1
k,arg1+6,Rw,Teta(arg2),Zbm
k,arg1+7,Rw,Teta(arg2),Zok
k,arg1+8,Rw,Teta(arg2),Zsgm
k,arg1+9,RI,Teta(arg2),Zsgm
k,arg1+10,RI,Teta(arg2),Zok
k,arg1+11,RI,Teta(arg2),Zbm
k,arg1+12,RI,Teta(arg2),Zqa1
k,arg1+13,Rfl(arg2),Teta(arg2),Zfl(arg2)
k,arg1+14,Rmaxb(arg2),Teta(arg2),Zmaxb(arg2)
k,arg1+15,Rmf,Teta(arg2),Zmf(arg2)
k,arg1+16,Rfaw,Teta(arg2),Zfw(arg2)
k,arg1+17,Rfaw,Teta(arg2),Zfa
k,arg1+18,Rfal,Teta(arg2),Zfa
k,arg1+19,Rfal,Teta(arg2),Zfl(arg2)
k,arg1+20,Rw,Teta(arg2),Zfa
k,arg1+21,Rmf,Teta(arg2),Zfa
k,arg1+22,Rmaxb(arg2),Teta(arg2),Zfa
k,arg1+23,Rfal,Teta(arg2),Zmaxb(arg2)
k,arg1+24,Rfal,Teta(arg2),Zqa1

!variabler Wasserstand, wasserseitig
!variabler Wasserstand, luftseitig
!Größte Mauerbreite, W
!Felseinbindung, W
!Verbreiterung Querschnitt, W
!OK Bogenmauer, W
!Höhe oberer Kontrollgang, W
!OK Mauer, W
!OK Mauer, L
!Höhe oberer Kontrollgang, L
!OK Bogenmauer, L
!Verbreiterung Querschnitt, L
!Felseinbindung, L
!Größte Mauerbreite, L
!Höhe Mauerfußpunkt
!OK Fels, W
!UK Fels, W
!UK Fels, L
!OK Fels, L
!Hilfspunkt 1 für Volumenerzeugung
!Hilfspunkt 2 für Volumenerzeugung
!Hilfspunkt 3 für Volumenerzeugung
!Hilfspunkt 4 für Volumenerzeugung
!Hilfspunkt 5 für Volumenerzeugung

```

```

!Keypoints für den Querschnitt Block arg2 Ende
k,arg1+30,Rw,Teta(arg2+1),Zbm
k,arg1+31,Rw,Teta(arg2+1),Zok
k,arg1+32,Rw,Teta(arg2+1),Zsgm
k,arg1+33,RI,Teta(arg2+1),Zsgm
k,arg1+34,RI,Teta(arg2+1),Zok
k,arg1+35,RI,Teta(arg2+1),Zbm

!OK Bogenmauer, W
!Höhe oberer Kontrollgang, W
!OK Mauer, W
!OK Mauer, L
!Höhe oberer Kontrollgang, L
!OK Bogenmauer, L

```

4.4 Macro „VolDef“ zur Volumengenerierung

```

!Macro zur Volumenerzeugung in der Staumauer von Block 1 bis 10 in Abhängigkeit vom Blocktyp
!arg1 = 1. KP-Nummer - 1 am Blockanfang
!arg2 = 1. KP-Nummer - 1 am Blockende
!arg3 = Blocknummer
*IF,Typ(arg3),eq,1,THEN
!Blocktyp1
!Zmaxb(arg1)>Zqa1, Zfw(arg1)>Zqa1 und Zfl(arg1)>Zqa1
!Zmaxb(arg2)<Zqa1, Zfw(arg2)>Zqa1 und Zfl(arg2)>Zqa1
v,arg1+8,arg1+9,arg1+33,arg1+32,arg1+6,arg1+11,arg1+35,arg1+30 !SGM V1
v,arg1+6,arg1+11,arg1+35,arg1+30,arg1+4,arg1+13,arg2+13,arg2+4 !BGM V2
v,arg1+4,arg1+13,arg2+13,arg2+4,arg1+3,arg1+14,arg2+12,arg2+5 !BGM V3
v,arg1+3,arg1+14,arg2+12,arg2+5,arg1+3,arg1+14,arg2+14,arg2+3 !BGM V4
v,arg1+3,arg1+15,arg1+14,arg1+14,arg2+3,arg2+15,arg2+14,arg2+14 !BGM V5
v,arg1+4,arg1+16,arg2+16,arg2+4,arg1+20,arg1+17,arg2+17,arg2+20 !Fels V6
v,arg1+3,arg1+15,arg2+15,arg2+3,arg1+20,arg1+21,arg2+21,arg2+20 !Fels V7
v,arg1+15,arg1+21,arg2+21,arg2+15,arg1+14,arg1+22,arg2+22,arg2+14 !Fels V8
v,arg1+22,arg1+14,arg2+14,arg2+22,arg1+18,arg1+23,arg2+23,arg2+18 !Fels V9
v,arg1+14,arg1+23,arg2+23,arg2+14,arg1+13,arg1+19,arg2+24,arg2+12 Fels V10
v,arg1+13,arg1+19,arg2+24,arg2+12,arg1+13,arg1+19,arg2+19,arg2+13 !Fels V11

```


*ELSEIF,Typ(arg3),eq,2,THEN

!Blocktyp 2

!Zmaxb(arg1)<Zqa1, Zfw(arg1)>Zqa1 und Zfl(arg1)>Zqa1

!Zmaxb(arg2)<Zqa1, Zfw(arg2)<Zqa1 und Zfl(arg2)>Zqa1

v,arg1+8,arg1+9,arg1+33,arg1+32,arg1+6,arg1+11,arg1+35,arg1+30	!SGM V1
v,arg1+6,arg1+11,arg1+35,arg1+30,arg1+4,arg1+13,arg2+13,arg2+5	!BGM V2
v,arg1+4,arg1+13,arg2+13,arg2+5,arg1+4,arg1+13,arg2+12,arg2+4	!BGM V3
v,arg1+4,arg1+13,arg2+12,arg2+4,arg1+5,arg1+12,arg2+12,arg2+4	!BGM V4
v,arg1+5,arg1+12,arg2+12,arg2+4,arg1+3,arg1+14,arg2+14,arg2+3	!BGM V5
v,arg1+3,arg1+15,arg1+14,arg1+14,arg2+3,arg2+15,arg2+14,arg2+14	!BGM V6
v,arg1+4,arg1+16,arg2+16,arg2+4,arg1+20,arg1+17,arg2+17,arg2+20	!Fels V7
v,arg1+3,arg1+15,arg2+15,arg2+3,arg1+20,arg1+21,arg2+21,arg2+20	!Fels V8
v,arg1+15,arg1+21,arg2+21,arg2+15,arg1+14,arg1+22,arg2+22,arg2+14	!Fels V9
v,arg1+22,arg1+14,arg2+14,arg2+22,arg1+18,arg1+23,arg2+23,arg2+18	!Fels V10
v,arg1+14,arg1+23,arg2+23,arg2+14,arg1+12,arg1+24,arg2+24,arg2+12	!Fels V11
 v,arg1+12,arg1+24,arg2+24,arg2+12,arg1+13,arg1+19,arg2+19,arg2+13	 !Fels V12

*ELSEIF,Typ(arg3),eq,3,THEN

!Blocktyp 3

!Zmaxb(arg1)<Zqa1, Zfw(arg1)<Zqa1 und Zfl(arg1)>Zqa1

!Zmaxb(arg2)<Zqa1, Zfw(arg2)<Zqa1 und Zfl(arg2)>Zqa1

v,arg1+8,arg1+9,arg1+33,arg1+32,arg1+6,arg1+11,arg1+35,arg1+30	!SGM V1
v,arg1+6,arg1+11,arg1+35,arg1+30,arg1+5,arg1+13,arg2+12,arg2+5	!BGM V2
v,arg1+5,arg1+13,arg2+12,arg2+5,arg1+5,arg1+13,arg2+13,arg2+4	!BGM V3
v,arg1+5,arg1+13,arg2+13,arg2+4,arg1+4,arg1+12,arg2+13,arg2+4	!BGM V4
v,arg1+4,arg1+12,arg2+13,arg2+4,arg1+3,arg1+14,arg2+14,arg2+3	!BGM V5
v,arg1+3,arg1+15,arg1+14,arg1+14,arg2+3,arg2+15,arg2+14,arg2+14	!BGM V6
v,arg1+4,arg1+16,arg2+16,arg2+4,arg1+20,arg1+17,arg2+17,arg2+20	!Fels V7
v,arg1+3,arg1+15,arg2+15,arg2+3,arg1+20,arg1+21,arg2+21,arg2+20	!Fels V8
v,arg1+15,arg1+21,arg2+21,arg2+15,arg1+14,arg1+22,arg2+22,arg2+14	!Fels V9
v,arg1+22,arg1+14,arg2+14,arg2+22,arg1+18,arg1+23,arg2+23,arg2+18	!Fels V10
v,arg1+14,arg1+23,arg2+23,arg2+14,arg1+12,arg1+24,arg2+19,arg2+13	!Fels V11
v,arg1+12,arg1+24,arg2+19,arg2+13,arg1+13,arg1+19,arg2+19,arg2+13	!Fels V12

*ELSEIF,Typ(arg3),eq,4,THEN

!Blocktyp 4

!Zmaxb(arg1)<Zqa1, Zfw(arg1)<Zqa1 und Zfl(arg1)<Zqa1

!Zmaxb(arg2)<Zqa1, Zfw(arg2)<Zqa1 und Zfl(arg2)<Zqa1

v,arg1+8,arg1+9,arg1+33,arg1+32,arg1+6,arg1+11,arg1+35,arg1+30	!SGM V1
v,arg1+6,arg1+11,arg1+35,arg1+30,arg1+5,arg1+12,arg2+12,arg2+5	!BGM V2
v,arg1+5,arg1+12,arg2+12,arg2+5,arg1+4,arg1+13,arg2+13,arg2+4	!BGM V3
v,arg1+4,arg1+13,arg2+13,arg2+4,arg1+3,arg1+14,arg2+14,arg2+3	!BGM V4
v,arg1+3,arg1+15,arg1+14,arg1+14,arg2+3,arg2+15,arg2+14,arg2+14	!BGMr V5
v,arg1+4,arg1+16,arg2+16,arg2+4,arg1+20,arg1+17,arg2+17,arg2+20	!Fels V6
v,arg1+3,arg1+15,arg2+15,arg2+3,arg1+20,arg1+21,arg2+21,arg2+20	!Fels V7
v,arg1+15,arg1+21,arg2+21,arg2+15,arg1+14,arg1+22,arg2+22,arg2+14	!Fels V8
v,arg1+22,arg1+14,arg2+14,arg2+22,arg1+18,arg1+23,arg2+23,arg2+18	!Fels V9
v,arg1+14,arg1+23,arg2+23,arg2+14,arg1+13,arg1+19,arg2+19,arg2+13	!Fels V10

*ELSEIF,Typ(arg3),eq,5,THEN

!Blocktyp 5

!Zmaxb(arg1)<Zqa1, Zfw(arg1)<Zqa1 und Zfl(arg1)<Zqa1

!Zmaxb(arg2)<Zqa1, Zfw(arg2)>Zqa1 und Zfl(arg2)>Zqa1

v,arg1+8,arg1+9,arg1+33,arg1+32,arg1+6,arg1+11,arg1+35,arg1+30	!SGM V1
v,arg1+6,arg1+11,arg1+35,arg1+30,arg1+5,arg1+12,arg2+13,arg2+4	!BGM V2
v,arg1+5,arg1+12,arg2+13,arg2+4,arg1+4,arg1+13,arg2+13,arg2+4	!BGM V3
v,arg1+4,arg1+13,arg2+13,arg2+4,arg1+4,arg1+13,arg2+12,arg2+5	!BGM V4
v,arg1+4,arg1+13,arg2+12,arg2+5,arg1+3,arg1+14,arg2+14,arg2+3	!BGM V5
v,arg1+3,arg1+15,arg1+14,arg1+14,arg2+3,arg2+15,arg2+14,arg2+14	!BGM V6
v,arg1+4,arg1+16,arg2+16,arg2+4,arg1+20,arg1+17,arg2+17,arg2+20	!Fels V7

v,arg1+3,arg1+15,arg2+15,arg2+3,arg1+20,arg1+21,arg2+21,arg2+20	!Fels V8
v,arg1+15,arg1+21,arg2+21,arg2+15,arg1+14,arg1+22,arg2+22,arg2+14	!Fels V9
v,arg1+22,arg1+14,arg2+14,arg2+22,arg1+18,arg1+23,arg2+23,arg2+18	!Fels V10
v,arg1+14,arg1+23,arg2+23,arg2+14,arg1+13,arg1+19,arg2+24,arg2+12	!Fels V11
v,arg1+13,arg1+19,arg2+24,arg2+12,arg1+13,arg1+19,arg2+19,arg2+13	!Fels V12

*ENDIF

4.5 Macro „VOVB“ zur Verbindung der Volumen

!Macro zur Verbindung der Volumen an den Volumenübergängen
 !im Bogenmauer- und Felsbereich durch Löschen doppelter Keypoints (nicht im Schwergewichtsmauerteil
 → Fugen!)

ksel,s,,,3,6,1	!Auswahl der zu verbindenden Keypoints Block 1
ksel,a,,,11,24,1	!Auswahl der zu verbindenden Keypoints Block 1
ksel,a,,,30,35,5	!Auswahl der zu verbindenden Keypoints Block 1
kpn=0	!1. KP-Nummer-1
delkpn=50	!Inkrement für KP-Nummern
*DO,bln,2,12,1	!Do-Schleife in Block 2 bis 10
VVerb,kpn	!Aufruf Macro für die zu verbindenden Keypoints in Block 2 bis 10
kpn=kpn+delkpn	!Erhöhen der KP-Nummer
*ENDDO	
ksel,a,,,603,626,1	!Auswahl der zu verbindenden Keypoints im Widerlagereich West der Bogenstaumauer
ksel,a,,,653,674,1	
ksel,a,,,703,726,1	!Auswahl der zu verbindenden Keypoints im Widerlagereich Ost der Bogenstaumauer
ksel,a,,,753,774,1	
ksel,a,,,803,816,1	!Auswahl der zu verbindenden Keypoints im Widerlagereich West (Fels)
ksel,a,,,819,823,1	
ksel,a,,,831,834,1	
ksel,a,,,903,916,1	!Auswahl der zu verbindenden Keypoints im Widerlagereich Ost (Fels)
ksel,a,,,919,924,1	
ksel,a,,,931,934,1	
nummrg,kp	!Zusammenfassen der ausgewählten Keypoints
allsel	!Auswahl aufheben

4.6 Macro „MZW2“ zur Zuweisung des Materialtyps

!Macro für die Zuweisung der Materialparameter im Felsbereich

kpn=0	!1. KP-Nummer-1
delkpn=50	!Inkrement für KP-Nummern
ksel,s,,,16,24,1	!Auswahl der Keypoints im Block 1 der Staumauer
*DO,bln,2,11,1	!Do-Schleife von Block 2 bis 10 der Staumauer
Fels,kpn	!Macro zur Auswahl der Keypoints im Fels
kpn=kpn+delkpn	!Erhöhen der KP-Nummer
*ENDDO	
ksel,a,,,616,626,1	!Auswahl der Keypoints im Fels im Widerlagereich West der Bogenstaumauer
ksel,a,,,666,674,1	
ksel,a,,,716,726,1	!Auswahl der Keypoints im Fels im Widerlagereich Ost der Bogenstaumauer
ksel,a,,,766,774,1	
lslk,r,0	!Auswahl der zugehörigen Linien
asll,r,0	!Auswahl der zugehörigen Flächen
vslla,r,0	!Auswahl der zugehörigen Volumen
eslv,r	!Auswahl der zugehörigen Elemente
mpchg,2,all	!Zuweisung des Materialtyps 2 für den Fels
allsel	!Auswahl aufheben

4.7 Macro „BT1-Temp“ zum Antragen der Betontemperaturen

!Macro zum Aufbringen der Betontemperatur BT1

BSELNW	!Macro zur Auswahl aller Knoten, die im Bereich des Wasserstaus liegen
nsl,r,loc,z,Zfw,147.50	!Auswahl aller Knoten, die auf den ausgewählten Flächen eine z-Koordinate zwischen Zfw und Zw haben
d,all,temp,BT1	!Temperaturrandbedingungen
allsel	!Auswahl aufheben
kpn=0	!1. KP-Nummer-1
delkpn=50	!Inkrement für KP-Nummern
ksel,s,,,9	!Auswahl luftseitigen Keypoints in Block 1
ksel,a,,,33	
ksel,a,,,11,13,2	
ksel,a,,,19	
*DO,bln,2,12,1	!Do-Schleife von Block 2 bis 10 der Staumauer
LS1,kpn	!Macro zur Auswahl aller luftseitigen Keypoints der Staumauer
kpn=kpn+delkpn	!Erhöhen der KP-Nummer
*ENDDO	
kpn=100	!1. KP-Nummer-1
delkpn=50	!Inkrement für KP-Nummern

*DO,bln,1,9,1	!Do-Schleife von Block 2 bis 10 der Staumauer
LS2,kpn	!Macro zur Auswahl der luftseitigen Keypointnummer arg1+12
kpn=kpn+delkpn	!Erhöhen der KP-Nummer
*ENDDO	
ksel,a,,,661,663,2	!Widerlagerbereich
ksel,a,,,669	
ksel,a,,,834	
ksel,a,,,761,763,2	
ksel,a,,,769	
ksel,a,,,934	
lslk,r,1	!Auswahl der zugehörigen Linien
asll,r,1	!Auswahl der zugehörigen Flächen
asel,u,,,65,117,52	!Auswahl der Fläche Nr. 65 und 117 aufheben
asel,u,,,408	!Auswahl der Fläche Nr. 408 und 117 aufheben
nsla,r,1	!Auswahl der zugehörigen Knoten
nsl,r,loc,z,Zfw,147.50	!Auswahl aller Knoten, die auf den ausgewählten Flächen eine z-Koordinate zwischen 184 und 192.50 haben
d,all,temp,BT1	!Temperaturrendbedingungen BT1
allsel	!Auswahl aufheben

4.8 Macro „LWTempT“ zum Aufbringen der wasserseitigen Lufttemperatur

!Macro zum Aufbringen der wasserseitigen Lufttemperatur von DTLW (einschl. Krone)

DTLW=Daten(Arg1,2)

kpn=0	!1. KP-Nummer-1
delkpn=50	!Inkrement für KP-Nummern
ksel,s,,,4,8,1	!Auswahl wasserseitigen Keypoints in Block 1
ksel,a,,,30,32,1	
ksel,a,,,16	
*DO,bln,2,12,1	!Do-Schleife von Block 2 bis 10 der Staumauer
PW1,kpn	!Macro zur Auswahl aller wasserseitigen Keypoints der Staumauer
kpn=kpn+delkpn	!Erhöhen der KP-Nummer
*ENDDO	
ksel,a,,,625	!Widerlagerbereich
ksel,a,,,480	
ksel,a,,,504,516,12	
ksel,a,,,725	
kpn=0 !1. KP-Nummer-1	
delkpn=50 !Inkrement für KP-Nummern	
*DO,bln,1,11,1	!Do-Schleife von Block 2 bis 10 der Staumauer
Krone,kpn	!Macro zur Auswahl aller Keypoints auf der Mauerkrone
kpn=kpn+delkpn	!Erhöhen der KP-Nummer
*ENDDO	
ksel,a,,,6,11,5	!Widerlagerbereich
ksel,a,,,625	
...	

ksel,a,,,981	
lslk,r,1	!Auswahl der zugehörigen Linien
asll,r,1	!Auswahl der zugehörigen Flächen
asel,u,,,70	!Auswahl der Fläche Nr. 70 aufheben
nsla,r,1	!Auswahl der zugehörigen Knoten
*IF,Zw,GE,RZw,THEN	!Fall 1: Zw > RZW (oder gleich)
nsl,r,loc,z,Zw,Zsgm	!Auswahl aller Knoten, die auf den ausgewählten Flächen eine z-Koordinate zwischen Zw und Zsgm haben
*ELSEIF,ZW,LT,RZw	!Fall 2: Zw < RZW
nsl,r,loc,z,RZw,Zsgm	!Auswahl aller Knoten, die auf den ausgewählten Flächen eine z-Koordinate zwischen RZW und Zsgm haben
*ENDIF	
sfcum,all,repl	
sf,all,conv,KLB,DTLW	!Aufbringen der Lufttemperatur DTLW
allsel	!Auswahl aufheben

4.9 Macro „RBA“ zum Aufbringen der Randbedingungen (Strukturanalyse)

!Macro für die Randbedingungen in der Aufstandsfläche des Fels	
kpn=0	!1. KP-Nummer-1
delkpn=50	!Inkrement für KP-Nummern
ksel,s,,,17,18,1	!Auswahl Keypoints in der Aufstandsfläche Block 1
ksel,a,,,20,22,1	
*DO,bln,2,12,1	!Do-Schleife von Block 2 bis 10 der Staumauer
RB1,kpn	!Macro zur Auswahl Keypoints in der Aufstandsfläche
kpn=kpn+delkpn	!Erhöhen der KP-Nummer
*ENDDO	
ksel,a,,,617,618,1	!Auswahl der Keypoints im Fels im Widerlagereich West der Bogenstaumauer
ksel,a,,,620,626,1	
ksel,a,,,667,668,1	
ksel,a,,,670,674,1	
ksel,a,,,717,718,1	!Auswahl der Keypoints im Fels im Widerlagereich Ost der Bogenstaumauer
ksel,a,,,720,726,1	
ksel,a,,,767,768,1	
ksel,a,,,770,774,1	
ksel,a,,,817,818,1	!Auswahl der Keypoints im Fels im Widerlagereich West (Fels)
ksel,a,,,820,824,1	
ksel,a,,,831,834,1	
ksel,a,,,867,868,1	
ksel,a,,,870,873,1	
ksel,a,,,882,883,1	
ksel,a,,,917,918,1	!Auswahl der Keypoints im Fels im Widerlagereich Ost (Fels)
ksel,a,,,920,924,1	
ksel,a,,,931,934,1	
ksel,a,,,967,968,1	

ksel,a,,,970,974,1
ksel,a,,,982,983,1

lsll,r,1	!Auswahl der zugehörigen Linien
asll,r,1	!Auswahl der zugehörigen Flächen
nsll,r,1	!Auswahl der zugehörigen Knoten
d,all,ux	!Festhaltung in x-Richtung (radial)
d,all,uy	!Festhaltung in y-Richtung (tangential)
d,all,uz	!Festhaltung in z-Richtung
allsel	!Auswahl aufheben

4.10 Macro „WDruckD“ zum Aufbringen des hydrostatischen Differenzdrucks

!Macro zum Aufbringen eines hydrostatischen Differenzdruckes bei einer Stauhöhe von Zw, einer Referenzstauhöhe von RZw und einer Wasserdichte von 1000 kg/m³ bei 4°C, Steigung von 9807 N/m³ in z-Richtung, Druck ist Null bei z=Zw und SF=Zw x 9807 N/m² bei z=Zfw

sfcum,pres,add	!Befehl zur Addition der nachfolgend aufgebrauchten Lasten
BSELNW	!Macro zur Auswahl aller Knoten, die im Bereich des Wasserstaus liegen
nsel,r,loc,z,Zfw,Zw	!Auswahl aller Knoten, die auf den ausgewählten Flächen eine z-Koordinate zwischen Zfw und Zw haben
wd1=9807*(Zw-Zfw)	!Berechnung des Wasserdrucks in Abhängigkeit von der Stauhöhe Zw
sfgrad,pres,0,z,Zfw,-9807	!Definition des Druckgradienten
sf,all,pres,wd1	!Aufbringen des Wasserdrucks wd1
allsel	!Auswahl aufheben
BSELNW	!Macro zur Auswahl aller Knoten, die im Bereich des Wasserstaus liegen
nsel,r,loc,z,Zfw,RZw	!Auswahl aller Knoten, die auf den ausgewählten Flächen eine z-Koordinate zwischen Zfw und RZw haben
wd2=-9807*(RZw-Zfw)	!Berechnung des Wasserdrucks in Abhängigkeit von der Referenzstauhöhe RZw
sfgrad,pres,0,z,Zfw,9807	!Definition des Druckgradienten
sf,all,pres,wd2	!Aufbringen des Wasserdrucks wd2 in entgegengesetzter Richtung zu wd1
allsel	!Auswahl aufheben

Lebenslauf

Name: Sandra Britta Fahland
Adresse Hinter den Brüdern 15
38640 Goslar

Geburtsdatum: 15. Juli 1971
Geburtsort: Höxter
Familienstand: ledig
Staatsangehörigkeit: Deutsch

Schulausbildung

1978-1982 Heinrich-Sohnrey-Grundschule Boffzen
1982-1991 Städtisches König-Wilhelm-Gymnasium Höxter
Abschluss: Abitur

Hochschulausbildung

10/1991-5/1997 Studium Bauingenieurwesen an der
Technischen Universität Braunschweig
Schwerpunkte:
Grundbau und Bodenmechanik, Statik und Massivbau
Abschluss: Diplom-Ingenieur

Thema der Diplomarbeit:
Ermittlung von Belastungen auf Grundbauwerke aus
gemessenen Verformungen und Bewegungen

Berufliche Tätigkeit

seit 7/1997 Wissenschaftliche Mitarbeiterin am
Institut für Geotechnik und Markscheidewesen
an der Technischen Universität Clausthal

Mitglied in der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V. - DGGT